

转基因生物安全吗

魏 伟 钱迎倩 编著

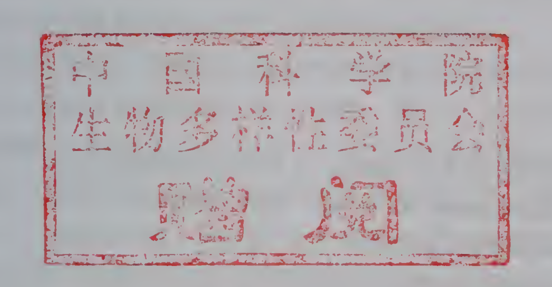
中国林业出版社



"生物多样性保护"系列丛书

转基因生物安全吗

魏 伟 钱迎倩 编著





中国林业出版社

图书在版编目（CIP）数据

转基因生物安全吗/魏伟，钱迎倩 编著.—北京：中国林业出版社，2005.6
（“生物多样性保护”系列丛书）
ISBN 7-5038-3956-2

Ⅰ.转… Ⅱ.①魏… ②钱… Ⅲ.生物－外源－遗传工程－安全技术
Ⅳ.Q788

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 014396 号

“生物多样性保护”系列丛书

主　编：陈宜瑜
副主编：康　乐　马克平

出版　中国林业出版社（100009　北京西城区刘海胡同 7 号）
E-mail　cfphz@ public. bta. net. cn　**电话**　66184477
发行　新华书店北京发行所
印刷　三河市富华印刷包装有限公司
版次　2006 年 1 月第 1 版
印次　2006 年 1 月第 1 次
开本　850mm × 1168mm　1/32
印张　4. 625
字数　119 千字
印数　1 ~ 2000 册
定价　19. 00 元

序

生物多样性是生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和，包括数以百万计的动物、植物、微生物和它们所拥有的基因以及它们与生存环境形成的复杂的生态系统，是生命系统的基本特征。人类文化的多样性也可被认为是生物多样性的一部分。正如遗传多样性和物种多样性一样，人类文化（如游牧生活和移动耕作）的一些特征表现出人们在特殊环境下生存的策略。同时，与生物多样性的其他方面一样，文化多样性有助于人们适应不断变化的外界条件。文化多样性表现在语言、宗教信仰、土地管理实践、艺术、音乐、社会结构、作物选择、膳食以及无数其他的人类社会特征的多样性上。

生物多样性是人类赖以生存的物质基础，具有巨大的商品和公益价值。其价值主要体现在两个方面：第一，直接价值，从生物多样性的野生和驯化的组分中，人类得到了所需的全部食品、许多药物和工业原料，同时，它在娱乐和旅游业中也起着重要的作用；第二，间接价值，间接价值主要与生态系统的服务功能有关，通常它并不表现在国家核算体制上，但如果计算出来，它的价值大大超过其消费和生产性的直接价值。据 Costanza 等估计，全球生物多样性每年为人类创造约 33 万亿美元的价值。生物多样性的间接价值主要表现在固定太阳能、调节水文学过程、防止水土流失、调节气候、吸收和分解污染物、贮存营养元素并促进养分循环和维持进化过程等方面。随着时间的推移，生物多样性的最大价值可能在于为人类提供适应当地和全球变化的机会。生物多样性的未知潜力为人类的生存与发展显示了不可估量的美好

前景。

近年来，物种灭绝的加剧，遗传多样性的减少，以及生态系统特别是热带森林的大规模破坏，引起了国际社会对生物多样性问题的极大关注。生物多样性丧失的直接原因主要有生境丧失和片段化、外来种的侵入、生物资源的过度开发、环境污染、全球气候变化和工业化的农业及林业等。但这些还不是问题的根本所在。根源在于人口的剧增和自然资源消耗的高速度、不断狭窄的农业、林业和渔业的贸易谱、经济系统和政策未能评估环境及其资源的价值、生物资源利用和保护产生的惠益分配的不均衡、知识及其应用的不充分以及法律和制度的不合理等。总而言之，人类活动是造成生物多样性以空前速度丧失的根本原因。据估计，由于人类活动引起的人为灭绝比自然灭绝的速度至少大 100 倍。引起了国际社会的普遍关注，各国政府纷纷制订有关生物多样性、特别是受威胁物种保护的法规。在生物多样性保护的进程中具有历史意义的事件是 1992 年在巴西首都里约热内卢召开的联合国环境与发展大会。在这次会议上通过了 5 个重要文件，其中之一即《生物多样性公约》。当时有 150 多个国家的首脑在《公约》上签字。《公约》 于 1993 年 12 月 29 日正式生效，目前已有 188 个国家或地区成为缔约方。其宗旨是保护生物多样性、持续利用生物多样性以及公平共享利用遗传资源所取得的惠益。

中国是世界上少数几个“生物多样性特别丰富的国家”之一，现存物种总数约占全世界的 10% 。中国又是世界上人口最多、人均资源占有量低。中国比其他国家更依赖于生物多样性。然而，巨大的人口压力、高速的经济发展对资源需求的日益增加和利用不当，使中国生物多样性受到极为严重的威胁。据调查，我国的生态系统有 40% 处于退化甚至严重退化的状态，生物生产力水平很低，已经危及到社会和经济的发展；中国有 15% ~20% 的物种受到严重威胁；遗传多样性大量丧失。中国作为世界栽培

植物起源中心之一，有相当数量的、携带宝贵种质资源的野生近缘种分布，其生境受到严重破坏，形势十分严峻。而且中国的保护区多在经济不发达地区，用于保护区的费用远远低于世界平均水平。如果不立即采取有效措施，遏制这种恶化的态势，中国的可持续发展是很难实现的。

为了推动生物多样性研究工作，及时反映这方面的研究成果，促进跨世纪的人才的培养，中国科学院生物多样性委员会曾组织并完成了“生物多样性研究”丛书，对于推动我国的生物多样性研究工作起到了积极的推动作用。随着近年来对生物多样性知识的普及和宣传，我国各级政府的有关管理人员和决策者对生物多样性的重要意义有所认识，保护意识也有所提高，但对于保护和可持续利用的需要还有较大差距。为此，中国科学院生物多样性委员会又组织有关专家编写这套“生物多样性保护”系列丛书，以进一步提高政府部门和公众对生物多样性保护的认识水平。为实现《生物多样性公约》缔约国大会提出的在 2010 年基本遏制生物多样性丧失的态势提供必要的信息。

陈宜瑜

2005 年 11 月 21 日于北京中关村

前　　言

自从 1953 年，沃森（James Watson）和克里克（Francis Crick）发现了 DNA 双螺旋结构以来，人们对基因有了更确切的理解。20 世纪 80 年代以来，将亲缘关系比较远的外源基因插入生物体的基因组，从而获得一种具有新的功能的生物体的生物技术得到飞速发展。这种生物技术，我们称为遗传修饰技术或转基因技术。这种技术曾经在实验室里孕育了十多年，现在利用这种技术得到的产品已经走上市场，进入了人们的生活。中国是世界上第一个进行商品化种植转基因作物的国家，当转基因抗病毒烟草在中国大地上大面积生长时，距世界上第一株转基因植物在实验室里诞生还不到 10 年的时间，这也是需要我们记住的事实。这种技术在了解基因功能的科学研究中曾经发挥了巨大的作用，也将继续在后基因组时代充当主要的研究工具。但是对通过该技术获得的生物或产品是否会对人类健康和环境产生负面影响还存在质疑和争论。本书的目的就是要分析疑惑，讨论争论，以事实为依据，为关心生物安全的读者收集资料并展开分析。与读者一起追求合理的结论与推论，正视已经悄然走进我们生活中的这些生物技术产品。

实际上，当实验室里具有全能性的一个细胞不断分裂、分化，最后获得第一株再生植株的时候，当第一头克隆动物诞生的时候，当作为模式植物的拟南芥菜的基因组序列展示在科学家面前的时候，当从自然界中分离到第一个珍贵的遗传基因的时候，我们已经在体验生物技术的快乐了。诚然，转基因技术也是一种生物技术，但并不是生物技术的全部。

毋庸置疑，遗传修饰技术或称转基因技术已经为我们带来巨大的惠益。然而，同时这些新生事物也带来了一些问题。这也是我们心存疑惑的原因。为了解开疑团，为了寻求答案，需要我们一起去探求。在开始我们探求的旅程以前，需要我们首先了解关于生物安全世界上已经发生了什么，以及可能即将要发生什么。并且所了解的应该是不带任何偏见的事实。这正是本书要呈现给广大读者的，也是本书要努力做到的。在观察一个事件时，我们要努力凭着公正的态度，努力本着客观存在，将正反两方面以及其他不同的观点展现在读者面前。

在这里要声明的是，我们不反对转基因技术，更不反对生物技术。同时我们也坚决支持生物安全的研究，因为这是推动生物技术尤其是转基因技术产业健康发展同时保证人民身体健康和环境健康实现可持续发展的惟一出路。当然在转基因技术和生物安全之间找到一个平衡将是异常困难的，因为我们的知识和能力还是很有限的。重视生物安全的本身就是重视生物技术。为了生物技术的健康发展，为了人类生活条件的美满幸福，我们强烈呼吁所有的科技工作者尤其是生物技术工作者要重视生物安全的研究，我们呼吁广大群众关心生物安全，我们呼吁政府部门加强生物安全的管理，使我们的现存社会更加安全、更加舒适。我们不希望被当作转基因技术的反对派。如果读者读完本书后留下这样的印象，则是有违我们的初衷，也是我们写作的失败。

在这里,作者要感谢读者对本书的关注,也感谢中国科学院生物多样性委员会的支持。没有这样有力的支持,我们是很难有这样的决心和信心来完成这样一本书的,其出版也是不可能的。鉴于水平有限,书中有可能存在这样或那样的错误,我们欢迎批评,也期望得到读者的指正意见。

编　者

2005 年 6 月于北京

目　录

第一章 “生物安全”概念的由来

目前对“生物安全”这一名词的内涵可能包含着三种理解。有人认为，广义的生物安全英文为 Biosecurity，按自然保护国际联盟（IUCN）专家 McNeely 等对此术语的定义为：“管理由于某些生物体通过排斥、削弱、适应、抑制和根除等途径造成的对经济、环境和人体健康的各种风险”，也就是说，外来入侵的物种适应了新的生态系统而把原来当地的物种排斥或根除了，从而造成当地环境破坏、经济损失以及给人体健康带来威胁，因此要对这种外来入侵种进行管理。这种管理也可以包括针对转基因生物的管理，这就是第二种理解，英文为 Biosafety，这名词是针对《生物多样性公约》的条款中所指的“制定或采取办法以酌情管制、管理或控制由生物技术改性活生物体在使用和释放时可能产生的风险”提出来的。按联合国环境规划署的名词定义是：“作出各种努力以减轻或消除由于生物技术和其产物所造成的各种潜在风险”。第三种理解是针对当前国际上的生物武器以及生物恐怖主义者的防范，也就是对培养致病的微生物或它们的毒素或者用基因工程的手段制造基因武器来传播疾病，危害人类以及利用新的植物病害给敌人的农作物以致命的毁灭或用特殊的微生物灭绝各种驯养动物的控制措施。这本小册子要给大家介绍的生物安全仅局限于“由于生物技术及其产物所造成的各种潜在风险”的领域。

近年来，生物安全问题不仅在国际上是人们关注的热点，而且在国内的媒体上也经常可以看到有关的报道，特别是有关转基因食品安全性的报道。为了让大家对生物安全有一个正确的了

解，有必要把生物安全的概念先作一介绍。

一、什么是生物安全

在20世纪70年代早期，即重组DNA技术（从某个物种中分离特种基因并将其导入到其他生物体中的技术）发展的早期，就有一些科学家对与此项研究有关的潜在生物学和生态学风险，以及进入环境以后所带来的潜在危害表示担心。在科技界，有关这项技术安全性的争论一直没有停止。到20世纪80年代中后期，已有不少转基因生物陆续在实验室获得成功，有一部分已经进行中间试验，有的甚至已接近进入商业化生产阶段。生物安全这一术语在刊物及各种场合下逐渐多起来。一旦实现商业化生产，大量的转基因产物就会成为商品进行国际贸易。因此，转基因生物及其产品的越境转移，对环境可能产生的不利影响，对生物多样性保护和持续利用的影响，以及对人类健康的影响等问题，也就是转基因生物及其产品的安全性问题已涉及到国家与国家之间的利益问题。

1992年6月5日在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展会议所通过的《生物多样性公约》（以下简称《公约》）中，生物安全的内容已在有关条款中列入，并提出建议专门为生物安全设立一项议定书，作为制定有法律约束力的国际文件。为此，在1995年11月召开的《公约》缔约国第二次会议上，专门设立了一个生物安全全权特设工作组，以制定《生物安全协定草案》。由此可见，转基因作物及其产物一旦成为商品，与之相关的一系列问题不仅是科技界争论的科学技术问题，而且是涉及到经济、贸易，甚至政治问题。由于涉及各种国家的利益，议定书的谈判非常艰苦，经多年的谈判才最后定稿，被称为《生物多样性公约——卡塔赫纳生物安全议定书》（简称《议定书》）（图1-1），

并在2000年1月29日加拿大蒙特利尔召开的缔约国大会特别会议上正式通过。



图1-1 《生物多样性公约》与《卡塔赫纳生物安全议定书》

《议定书》的简介中对生物安全的概念有如下两段的叙述：

“生物安全是《公约》阐述的问题之一。这一概念所指的是各国必须保护人类健康与环境免受现代生物技术产品对其可能造成的有害影响，同时亦承认现代生物技术在提高人类生活质量方面具有极大的潜力，特别是在满足粮食、农业及卫生健康这些必不可少的需要方面。《公约》明确阐述了现代生物技术在两方面的孪生关系。一方面，《公约》对与生物多样性保护和持续利用相关技术的使用和转让（包括生物技术）提出了规定（例如，第16条第1段和第19条第1、2段）。另一方面，在第8（g）条和第19条第3段中，《公约》本着减少对生物多样性造成威胁的所有可能之总体目标，同时也考虑到人类健康所面临的风险，力求确立适当的程序以提高生物技术的安全。第8（g）条的规定与缔

约方应采取的国家级措施有关；而第 19 条第 3 段则为解决生物安全问题而须制定的有法律约束力的国际文件奠定了基础”。

“这份《议定书》为有利于环保的生物技术的应用创造了一个基础环境，从而使各缔约国能在最大限度地降低生物技术对环境和人类健康可能造成的风险的同时，尽可能从生物技术所能提供的潜力中获得最大的惠益”。

“转基因生物”（transgenic organisms）指的是通过转化技术将来自不同生物体的或人工的外源基因转入受体而获得的生物体。目前应用比较多的具有相似含义的名词尚有“遗传修饰生物体”（GMOs，Genetically Modified Organisms）以及“遗传工程生物体”（GEOs，Genetically Engineered Organisms）等。GMOs 在有关国家或国际组织的生物安全管理条例中使用比较频繁，强调通过重组 DNA 等生物技术获得的生物体，不仅仅包括转入外源基因的生物体，从字面意义上看，比转基因生物体的含义更广些。另有“改性活生物体”（LMOs，Living Modified Organisms）则是《生物多样性公约》和《生物多样性公约——卡塔赫纳生物安全议定书》的用语。

上述两段叙述辩证地说明了“生物安全”这一术语的概念，即既承认现代生物技术在满足人类食物、农业及卫生健康上具有极大的潜力，应该充分发挥其潜力去发展生物技术；但也必须注意到现代生物技术可能对环境产生不利的影响，可能影响到人类对生物多样性的保护和持续利用，也可能对人类健康造成危险。重视生物安全并制定了《议定书》，就会有目的、有步骤地研究现代生物技术给环境和人类健康可能带来的影响。解决这些可能

的影响，就会从现代生物技术所能提供的潜力中获得最大的惠益，并使生物技术能更好地造福于人类。

二、什么是转基因技术

1953 年沃森（Watson）和克里克（Crick）提出了 DNA 双螺旋结构模型，开创了分子生物学的新纪元。基于 DNA 双螺旋结构的理论基础，伯格（Berg）在 1972 年首次实现了体外重组 DNA 技术。其主要原理是按照人们的意愿，经过周密的设计，应用人工方法把某种生物的遗传物质（DNA）分离出来，在体外进行切割、拼接和重组，将重组了的 DNA 通过各种途径导入并整合到某种宿主细胞或个体的细胞核中，有目的地改变它们的遗传性状，这种创造新的生物类型的技术称为转基因技术。以转基因抗虫棉花为例，大家都知道，有一种生长在棉花上的昆虫叫棉铃虫，专吃棉花的叶片和棉桃，造成棉花大量减产。研究已经知道有一种细菌称为苏云金杆菌，菌体内有能产生可杀死棉铃虫的毒素的基因（简称 Bt 基因）。我们首先把细菌中这种基因的 DNA 分离提取出来，在体外进行切割、拼接和重组，然后通过各种途径将重组了的 DNA 导入并整合到棉花的细胞核中。经过这种技术处理后得到的棉花，其叶片和棉桃内就有了转进去的能表达毒素的细菌基因，棉铃虫吃了这种棉花的叶片或棉桃就会死亡。这种经过改造的棉花就称为转基因抗虫棉花。

首先我们介绍重组 DNA 技术。这里还是以转基因抗虫棉为例，第一步是将苏云金杆菌中能表达毒素的基因分离出来。把从细菌中提取到的全部 DNA 分子切割成所需的片段，然后将切割下来的片段有目的、有方向地再连接起来进行重组，有时为了便于 DNA 片段之间的连接，还需要对片段的末端进行加工（修饰）。DNA 的切割、修饰和连接都是依靠酶，切割 DNA 的酶称为

限制性内切酶，用于修饰的酶称为 DNA 片段末端修饰酶，连接 DNA 片段的酶称为 DNA 连接酶。这些酶统称为工具酶。

从苏云金杆菌 DNA 中通过切割得到的能表达毒素的基因称为目的基因。因为这种基因还将被转移到棉花的细胞核中去，因此又称为外源基因。而外源基因必须先同一种传递中介结合后才能进入受体细菌或动物、植物受体细胞中。这种能承载外源基因带入受体细胞的传递中介称之为基因克隆载体。这种载体具有能使外源基因组结合的克隆位点，可以携带外源基因进入受体细胞，并且能整合到受体细胞的基因组 DNA 上，随着基因组 DNA 的复制而复制。这种载体必须具有选择标记，使已带有外源基因载体的受体细胞，根据某种性状能够被筛选得出来。目前一般常用的基因克隆载体有质粒载体、噬菌体载体、病毒载体等等。

目的基因能否有效地转移到受体细胞内取决于 3 个条件：是否有适用的受体细胞、合适的克隆载体、以及合适的基因转移方法。

先介绍受体细胞。原核生物（例如细菌、蓝藻和农杆菌等）的细胞是很好的受体细胞。它们容易摄取外界的 DNA、增殖快、基因组简单，便于培养和基因操作，因此被普遍应用。真核生物（如酵母、动物和植物）的细胞，也是重要的受体细胞。酵母的某些性状与原核生物很类似，早期就被用作基因克隆受体。动物细胞由于体细胞不容易再分化成个体，所以经常用生殖细胞、受精细胞或者胚胎细胞作为受体细胞，由接受转基因的胚胎再进一步发育成转基因动物。

自 1997 年英国克隆出世界上第一头多莉羊后，情况发生了很大的变化，转基因的动物体细胞不仅有可能表达转基因的产物，还可以通过克隆技术培育出克隆动物。例如，现在已经成功培育出一种促红细胞生成素的转基因牛，由于红细胞生成素能促进红细胞的生成，对肿瘤化疗等红细胞减少症有积极的治疗效

果，人们想像如果能把这种转基因牛的体细胞进行克隆，将来就有可能从一头具优良性状的转基因牛身上取到大量的体细胞，通过克隆大量地获得较廉价的转基因牛。虽然该研究还会有不少困难，但前景非常看好。

植物组织培养在20世纪40年代已经开始研究，用植物的器官和组织培养成为植株已相当成熟。70年代后，一个植物细胞在人工合成的培养基中，如果温度等各种人工环境条件合适的话，不仅可以存活、生长、增殖，还可以再分化出根、茎、叶，经过移栽后还能长成一棵完整的植株，并能正常开花、结果。不仅植物细胞可再生长成完整植株，去掉细胞壁的裸露的植物细胞——原生质体也可以在人工培养条件下再长出细胞壁并再生成完整的植株。因此植物细胞也是理想的基因克隆受体细胞。

其次介绍克隆的载体。目的基因在转移到受体细胞之前，一般都需要先把含目的基因的DNA片段组装到合适的克隆载体上。这种克隆载体应该具有强启动子，才能使组入的目的基因能在受体细胞中有效地表达。此外，克隆载体还应该便于同含有目的基因的DNA片段进行连接。有了合适的克隆载体和含目的基因的DNA片段，选用合适的限制性内切酶切割，并用DNA连接酶连接好，就得到预期的重组DNA分子。

现在再介绍基因转移方法。重组DNA分子转移到原核细胞中一般通过转化、转导和三亲本杂交等途径。大肠杆菌是原核生物中应用最广泛的基因克隆受体。真核生物由于其细胞结构复杂，采用原核生物基因转移的方法效果不好，必须寻求分别适用于动物和植物的基因转移方法。较早把重组DNA分子转移到植物细胞的方法是用根癌农杆菌介导的Ti质粒载体转化法（图1-2）。由于该方法存在一定的局限性，随后又发展了电穿孔法、微弹轰击法、激光微束穿孔法、多聚物（如聚乙二醇（PEG））介导法和花粉管通道法等等，这些方法都可以把重组DNA分子直

接转移到植物细胞内。哺乳动物的细胞不易从周围获得 DNA，因而影响到哺乳动物转基因的发展。近年来发展了一系列有效地将外源 DNA 分子转移到哺乳动物细胞中的方法，主要有如下几种：病毒颗粒转导法、磷酸钙转染法、DEAE－葡聚糖转染法、聚阳离子－二甲亚砜（DMSO）处理转染法、脂质体介导法、显微注射转基因技术，以及类似用于植物细胞的电穿孔法等。

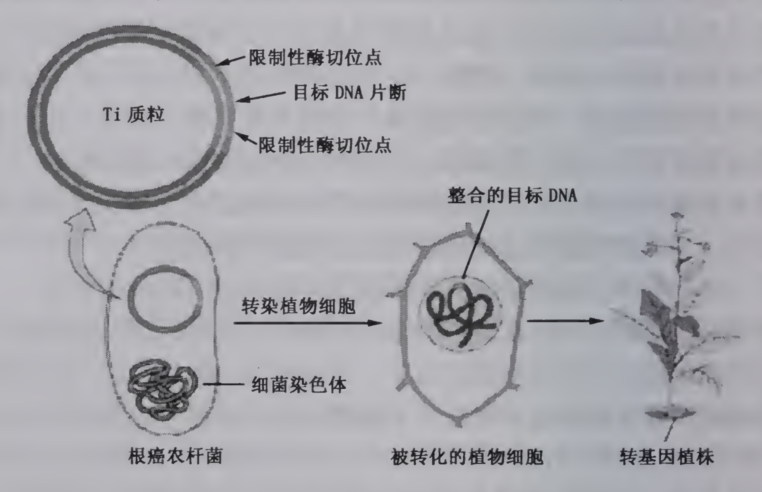


图 1-2　根癌农杆菌介导的 Ti 质粒载体转化植物过程的示意图
（引自马休·哈夫黑尔（Matthew D. Alfhill））

转移到受体细胞后的重组 DNA 分子称为克隆子。受体细胞经过各种转移方法处理后，真正获得目的基因并能有效表达的克隆子不会太多，绝大部分仍旧是原来的受体细胞，或者是不含目的基因的克隆子。为了把真正能有效表达的克隆子从大量经过处理的受体细胞中分离出来，必须建立了一系列筛选和鉴定克隆子的方法。利用克隆载体携带的选择标记基因筛选克隆子，现在最常用的选择标记基因有抗生素抗性基因和乳糖操纵子（lac Z′）基因等。在无法利用克隆载体选择标记的情况下，可以采用双酶切片段重组法。对于那些不宜用克隆载体选择标记筛选克隆子的

受体细胞，可以在含目的基因的 DNA 片段与克隆载体连接之前，先在目的基因上接一个报告基因，以后根据报告基因表达的产物来筛选克隆子。用上述方法筛选的克隆子，还有可能得到假的克隆子，可采用限制性内切酶分析、分子杂交、聚合酶链式反应（PCR）和 DNA 测序等方法来进一步鉴定克隆子的真假。

三、为什么要转基因

通过前面的介绍，大家已经知道了什么是转基因技术。转基因技术是基因工程的关键技术，而基因工程又是整个生物技术的核心。生物技术包括的内容非常广泛，至少包括有基因工程、细胞工程、酶工程、发酵工程以及蛋白质工程，基因工程这个核心工程的发展带动了其他几个工程的发展，从而在整体上推动了现代生物技术的快速发展。另一方面转基因技术对人类疾病的治疗、工农业的发展、能源危机的解决、环境污染的治理，甚至在军事上都能起很大的作用，转基因技术已被大家公认为 21 世纪经济和社会发展的关键技术之一。

1. 转基因技术在医药上的作用

医药卫生领域是基因工程应用最为广泛、发展最迅速、成绩最显著、潜力最大的一个领域。转基因技术在改进医药的生产、开发新的药品资源以及改善医疗手段等方面都起到显著的效果。这种技术还可以替代化学合成法或者组织提取法等成本昂贵的生产技术，还可以提供灵敏度高、反应专一、实用性强的临床诊断新试剂和新方法，以及提供安全性能好、免疫能力强的新一代疫苗。转基因疫苗是将病原体的抗原基因克隆在细菌（原核生物）或动植物（真核生物）细胞内，用来生产病原体的抗原，而不是用病原体本身作为疫苗，因此安全性能很高。20 世纪 90 年代后

又发展出核酸疫苗（基因疫苗），这是指将含有编码蛋白质基因序列的质粒载体，经过肌肉注射转移到受体（人或动物）内，通过抗原基因的表达，诱导受体产生对该抗原的免疫反应，以达到预防和治疗疾病的目的。20 世纪 80 年代后期，发达国家先后用重组 DNA 导入酵母，由酵母产生乙型肝炎抗原而制成乙肝疫苗。也有将重组 DNA 导入仓鼠细胞，由仓鼠细胞生产疫苗。基因克隆的艾滋病疫苗也已到了可以在人体上试验的阶段。正在研制或者已经上市的基因工程病毒性疾病疫苗还有疱疹病毒疫苗、腮腺炎病毒疫苗以及风疹病毒疫苗等等。此外，还有细菌类及寄生虫类的重组疫苗。

自从基因工程技术建立以及随后大量基因被克隆后，利用基因工程技术生产的贵重药物已有 20 种以上。抗生素对于细菌引起的疾病非常有效，自从 20 世纪 20 年代发现青霉素以来，迄今已发现了 6 000 多种抗生素，广泛应用的有 100 种左右。利用重组 DNA 技术可以达到提高抗生素产量和生产效率的目的。例如金霉素是由链霉素菌产生，这种菌在生长过程中需要一定的氧气，将与动物血红蛋白相类似的蛋白质基因转入链霉素，可使链霉素在较低氧含量下生长并产生较高含量的抗生素。20 世纪 70 年代以前，蛋白质药物的生产主要是从人的血液或尿液或动物的组织器官中提取，成本高，产率与产量又很低，原料来源也十分有限，更大的缺点是可能会感染到蛋白质药物来源的人或动物疾病，如肝炎病毒、艾滋病病毒的污染，而基因工程技术可解决上述问题。因该技术是将有治疗意义的蛋白质基因克隆后转移到细菌、酵母等生长旺盛的表达系统中，这个基因受到表达系统中强的表达元件的控制大量表达，从而得到大量药物。例如用传统技术提取 5 mg 的生长激素释放抑制因子需要 50 万头绵羊的脑子，而用转基因技术生产只需 9 L 细胞发酵液；又如 450 kg 猪胰脏才可以产 10 g 胰岛素，而用转基因技术只需 200 L 细菌培养液，并

且细菌、酵母生长条件简单，可以大量培养而大大降低成本，又没有各种病原体的污染，保证了安全性。1980 年 10 月第一个基因工程药物——治疗胰岛素依赖性糖尿病的人胰岛素批准上市。此后，有 300 多种不同的人源蛋白质的基因工程药物已被克隆，其中有几十种药物经过动物药理、毒理试验及临床试验后被批准上市。这些基因工程药物包括生长激素、干扰素、白细胞介素、尿激酶等。20 世纪 90 年代我国批准上市的基因工程药物有重组人干扰素、重组人白细胞介素 -2、重组人红细胞生成素以及链激酶等 10 种，对治疗乙肝、丙肝、类风湿、癌症辅助治疗，以及心梗溶栓等都起了很好的作用。细菌与酵母虽有很大的优点，可是有些基因在微生物系统中的表达产物会发生没有活性或活性很低的情况，解决途径之一是要在比较复杂的哺乳动物细胞或昆虫细胞中来表达。也就是说可以用家畜作为生物反应器来生产蛋白质药物。1998 年我国成功地培育出 5 头含有可治疗血友病的人凝血因子 IX 基因的转基因山羊，在其乳汁中测到了人凝血因子 IX。

此外，重组 DNA 技术还可用作疾病的基因治疗。所谓基因治疗是指将目的基因导入靶细胞后与宿主细胞内的基因发生重组，成为宿主细胞的一部分，并能稳定地遗传下去，以达到治疗疾病的目的。基因治疗分为 4 种，第一种称为基因置换，是用正常的基因整个地替代致病的突变基因；第二种是将突变基因的突变碱基序列用正常序列加以纠正，称为基因修正；第三种是将目的基因导入宿主细胞，利用目的基因的表达产物来改变宿主细胞的功能，或使原有功能得到加强，称为基因修饰；最后一种是基因失活，是用一种技术来封闭某些基因的表达，以抑制有害基因表达的目的。目前国际上已批准了 90 个左右基因治疗方案。到 1997 年初，国际上共记录有 2 000 个以上的基因治疗病例，其中 68% 是治疗肿瘤的，19% 是治疗遗传病的，另有 12% 是治疗传染

性疾病及其他一些疾病。2004 年 1 月 20 日，我国也是世界上第一个获得国家批准的基因治疗药物（重组人 p53 腺病毒注射液）获得批准正式上市。

2. 转基因技术在农业上的应用

转基因技术在农作物的改良以及畜牧、水产养殖等方面都有着美好的前景。现代生物技术发展以前，人类是用传统育种的方法来得到抗病、抗虫、优质、高产的各种农作物。但是传统育种的过程是一个非常缓慢又很艰辛的过程，并且还由于不同物种之间的杂交不亲和，使优良性状转移的范围受到很大的限制。重组 DNA 技术可以打破生物界之间的界线，基本上使原核生物之间，真核生物之间，甚至原核生物与真核生物的基因都能重组，大大地增加了各种优良性状转移的可能，并可以缩短育种周期。20 世纪 70 年代后转基因作物的发展非常迅速，到 80 年代已有相当数量的转基因植物在实验室中获得成功。1994 年美国政府第一个批准延长成熟的转基因番茄向环境大面积释放，意味着转基因农作物已经发展到商业化生产的规模。实际上我国的抗病毒转基因烟草早在 80 年代末、90 年代初就已在大田中有相当大面积的种植了。

植物雄性不育是自然界的普遍现象，利用雄性不育现象在农业上可以培育不育系。用不育系生产杂交种子可以增加农作物产量和改善品质。在自然界要找到不育系很不容易，现在利用重组 DNA 技术已经创造了一批不育系，在油菜和烟草生产上已得到应用。

恶劣的环境，如气候寒冷、土壤干旱、含盐量高、病虫害等会给植物很大的压力，大量的植物在这些压力下死亡了。少数具有抗性基因突变的植物能够适应恶劣环境，表现出各种抗逆的性状，但是自然界中这种遗传变异的筛选和固定过程是很缓慢的。

重组 DNA 技术由于是特定抗性基因的定向转移，频率较高，比自发突变可高出 $10^2 \sim 10^4$ 倍，既避免了盲目性，又在很大程度上提高了选择效率，还打破了种属的界限，细菌、真菌、动物、植物，甚至病毒来源的基因都可以应用。因此重组 DNA 技术已成为培育植物抗逆性的一种有效的手段。重组 DNA 技术也可用以改良种子的贮存蛋白和改良药用植物，如日本用来提高镇痛药莨菪胺生物合成的效率。此外，也有用以提高作物收获后的贮藏能力，如延长成熟期的转基因番茄；用于控制观赏植物的叶色、花数、花形、香味等性状；把植物作为生物反应器，通过转基因技术把生产药物（如胰岛素）的基因转移到植物体内，利用植物生产胰岛素。

动物养殖业的动物种类有哺乳类、爬行类、两栖类、鱼类、贝类和各种昆虫。养殖业要获得好的利润也需要有优良的品种，传统育种方法虽然已取得很好的成绩，但生物技术中的转基因技术又为养殖业提供了更为有效的技术手段，使养殖业在短时间内大量繁殖优良动物品种或创造新性状的良种成为可能。动物转基因技术是在细胞工程和胚胎工程的基础上发展起来的。将外源基因导入到动物的基因组内并获得表达，就得到了转基因动物。已成功获得的转基因动物有鱼、鸡、牛、马、羊等等。最早成功的转基因小鼠显示了动物转基因技术在提高动物的生产性能及抗病性等方面的广阔应用前景。近年来转基因动物作为生物反应器的研究越来越受到人们的重视，正向商业化生产道路上迈进。此外，重组 DNA 技术还可以促进胚胎移植的进展，如经重组的促性腺激素可大大提高胚胎移植的经济效益。

3. 转基因技术与食品

奶酪是营养价值很高的一种食品，奶酪的生产占奶制品业中最大的一部分。奶酪制造过程中牛奶蛋白质水解开始于一种粗制

凝乳酶的作用。在 20 世纪 60 年代，由于来自动物的粗制凝乳酶出现短缺，取用替代品，也存在一定的缺陷。到 80 年代时，人们通过基因工程获得了遗传修饰的微生物，它们可以生产与动物相同的凝乳酶，成分很单一，作用时间更容易把握。目前在欧洲已有出售这种经过遗传修饰的酶生产的奶酪，口味与用小牛凝乳酶生产的相同。在农产品的利用上，人们正在用转基因技术改善农作物的品质，如口感、营养、质地、颜色、形态、酸甜度、成熟期等等。例如用转基因手段提高人类必需的，但在谷物中普遍缺少的赖氨酸和色氨酸；又比如，利用转基因技术通过不含直链淀粉来提高马铃薯储存和加工特性，改变了淀粉组成，使马铃薯在工业上能更有效地加工。

4. 转基因技术与能源

在石油开采中，石油是通过油层的压力自发地沿着油井的管道向上喷出或被抽出，但是靠油层自身压力来采油，其采油量仅占油田石油总储存量三分之一左右，剩下的三分之二就得依靠二次采油和三次采油。在三次采油工艺中，可以用转基因技术来构建能产生大量二氧化碳和甲烷等气体的基因工程菌株或选育产气量高的菌株。把这些菌体连同它们所需的培养液一起注入到油层中，这些工程菌在油层中不仅产生气体增加压力，而且还能分泌高聚物、糖酯等表面活性剂，降低油层表面张力，使原油能从岩石、沙土中松开，黏度降低，从而提高了采油量。

乙醇是未来石油的一种替代物，但目前采用粮食来转化乙醇成本很高。随着微生物混合发酵及纤维素酶基因克隆与表达的深入研究，有可能直接利用大量农作物秸秆等纤维素发酵获得乙醇，以摆脱将来石油缺乏的困扰。此外，氢也是未来的新能源，在光合细菌中，已发现了 15 种左右紫色硫细菌和紫色非硫细菌能产生氢气，人们设想将产氢的基因克隆到水生藻类中，以大幅

度提高氢的产量。

5. 转基因技术与环境

国际上现已发展一门新兴的边缘学科——环境生物技术。指的是直接或间接利用生物体或生物体的某些组成部分或某些机能，建立能够降低或消除污染物产生的生产工艺，或者能够高效率净化环境污染，同时又能生产有用物质的工程技术。以基因工程为主导的污染防治技术是其中最高级的技术。比如应用基因工程构建高效降解杀虫剂和除草剂等污染物的基因工程菌，以及创建抗污染的转基因植物等等。在这方面，我国也取得相当大的进步，如中国科学院的科学家已经获得了抗汞污染的转基因烟草（图 1-3）。另外，人们正在研究的有降解卤代芳烃的基因工程菌、降解除草剂的工程菌、产生杀虫剂的工程菌、分解尼龙寡聚物的工程菌、防治重金属污染的工程菌以及清除石油污染物的基因工程菌等等。目前这类工程菌的应用还存在许多问题，需要加以解决。一是工程菌的遗传稳定性问题，往往经过几代后会丧失其特异性；二是安全性问题，这类菌大量释放到环境中会带来什么严重后果是值得慎重考虑的问题，也就是要考虑生物安全问题。

四、转基因植物知多少

转基因生物及其产物要成为商品一般大致要经过 3 个阶段：首先是在实验室中成功地获得转基因生物；第二步是要分别进行小规模（中间试验）和大规模（环境释放）的试验，如要成为食用商品的，还必须经过一系列的食品安全检验；第三步，经过环境试验和食品安全检验表明该转基因生物对环境及人体健康不会造成危害，然后就可以向政府有关主管部门（在中国是农业部）提出申请，批准后才能进入商业化生产阶段。



图 1-3　抗汞污染的转基因烟草在含有机汞培养基上萌发和生长情况
（a）非转基因烟草的种子在含汞培养基上不能正常萌发和生长；
（b）转基因烟草株系的种子在含汞培养基上能够正常萌发和生长。
（资料来源：科学通报，2002，47：1815）

由于目前转基因植物（作物）商品化的品种最多，规模最大，在此着重给大家介绍转基因植物的一些情况。科学家希望通过转基因技术改良农作物的性状如表 1-1 所列。

表 1-1　通过转基因技术希望改变的植物性状

序号	希望改变的植物性状
1.	抗虫性
2.	病毒、细菌和真菌等病害的抗性
3.	油分、淀粉和蛋白质特性，使作物除了在烘烤和酿造品质方面有所改善外，还更适合作为生物降解塑料、清洁剂、润滑油和纸张的原料
4.	除草剂抗性，使某些作物品种具有耐特定除草剂的能力；在很多情况下，可减少除草剂用量而同样达到有效控制杂草的目标
5.	植物结构和开花习性，如植物株高、开花时间和花色
6.	落粒性，减少种子收获时因落粒而造成的损失

（续）

序号	希望改变的植物性状
7.	果实和球茎成熟贮藏特性，例如延迟成熟、延长货架期的番茄、减少马铃薯储藏时施用发芽抑制剂的用量等
8.	增强抗逆能力，如对冷、热、渍、旱和盐碱土壤等逆境条件的抗性
9.	增强特定作物去除土壤中有毒金属的能力，修复污染了的环境
10.	消除某些作物的过敏性
11.	增加维生素、矿物质和抗癌物质成分
12.	用于药物生产，如可食性疫苗等

全世界至今在实验室已成功或正进入中试水平的转基因植物，据不完全统计约有 35 个科 120 个种左右，包括粮食、蔬菜、水果和林木等等。中国的转基因研究进展迅速，目前主要的农林植物都基本上进行了转基因的操作，包括水稻、玉米、番木瓜、广藿香、小麦、烟草、棉花、新疆甜瓜、白菜、番茄、大豆、甜椒、马铃薯、辣椒和杨树等。转基因的性状有抗虫、抗病毒、抗病、改良品质、抗冻、耐盐、耐除草剂和耐贮藏等等。据有关统计，1997 年至 2003 年 7 月，农业部共受理国内研究机构和企业的转基因生物申请 1 044 项，有 707 项申请被批准。其中中间试验 446 项，环境释放 198 项，生产性试验 55 项，商品化生产 73 项，属于 6 个类型：棉花（抗虫），番茄（抗病毒与晚熟），甜椒（抗病毒），矮牵牛（改变花色、抗病毒），兽用饲料添加剂，微生物农药产品。其中，在转基因作物中，只有 Bt 棉花及少数几种植物进入并通过品种审定阶段，所以实际上只有转基因棉花进行了商品化种植。而国家林业局于 2002 年 9 月，以颁布林木新品种的形式批准了一种转 Bt 基因抗虫杨的商品化生产。2003 年 9 月，以提高含油量为目的的转基因油菜产业化项目已经通过有关部门论证。

下面着重给大家介绍国际上已被批准进行大面积作商业化

种植的转基因植物的情况。最早进行转基因作物大面积商业化种植的国家是中国，在20世纪90年代前后就已有大面积抗病毒转基因烟草的种植。按国外的一个报道，1992年时的种植面积是8 600公顷，1994年达到100万公顷，尔后转基因烟草由于在国际上滞销而大面积减少，很快美国就取代中国成为世界上转基因作物种植面积最大的国家。詹姆斯（James C.）从1996年起对全球逐年转基因作物种植的各方面情况都做了报道，以下我们根据他的报道，介绍到2003年为止的转基因作物种植情况。1996年的转基因作物全球种植面积为170万公顷，然后逐年增加，到2003年时面积翻了40倍，达到6 770万公顷（图1-4）。这个数字是个比较保守的估计值，因为巴西恰好在种植季节前（2003年9月下旬）批准了抗除草剂大豆的种植，这样就很难估计2003～2004生长季转基因大豆的种植面积。在詹姆斯报告出版的时候，即2003年年底，巴西只种植了50%的大豆。因此，在6 770万公顷这个总面积中，报告保守估计了巴西2003年只种植了300万公顷的转基因大豆，最终的种植面积可能比这个数字高的多。6 770万公顷是个什么概念呢？它的大小相当于美国或中国国土面积的7%，几乎3倍于英国本土面积。

2003年，6 770万公顷的转基因作物分别种植在18个国家（2002年是16个国家，2003年巴西和菲律宾均是第一次批准转基因作物的种植，其中巴西种植的全部为转基因大豆）。但美国、阿根廷、加拿大、巴西、中国、南非等6个国家占全球转基因作物面积的99%，其中美国种植面积为4 280万公顷（占全世界的63%），阿根廷1 390万公顷（占21%），加拿大440万公顷（6%），巴西300万公顷（4%），中国280万公顷（4%）和南非40万公顷（1%）。2002年转基因作物种植面积比例美国占66%、阿根廷23%、加拿大6%、中国占4%（表1-2）。

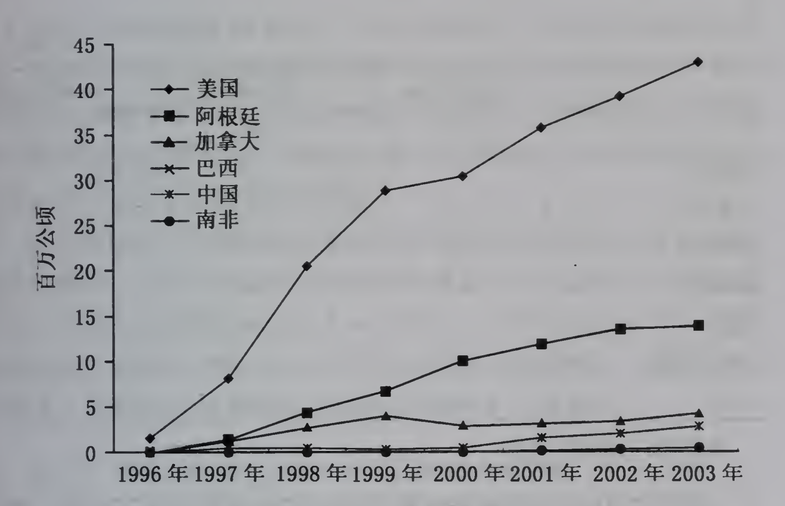


图 1-4 1996 ~ 2003 年转基因作物面积前 6 位的国家

（资料来源：詹姆斯，2003）

表 1-2 2002 ~ 2003 年 18 个国家转基因作物的面积（百万公顷）

国别	2002 年	占全球比例（%）	2003 年	占全球比例（%）	面积增减	增减比例（%）
美国*	39	66	42.8	63	+3.8	+10
阿根廷*	13.5	23	13.9	21	+0.4	+3
加拿大*	3.5	6	4.4	6	+0.9	+26
巴西*	–	–	3.0	4	+3.0	–
中国*	2.1	4	2.8	4	+0.7	+33
南非*	0.3	1	0.4	1	+0.1	+33
澳大利亚*	0.1	<1	0.1	<1	–	–
印度*	<0.1	<1	<0.1	<1	+0.05	+100
罗马尼亚*	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
乌拉圭*	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
西班牙	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
墨西哥	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–

（续）

国别	2002 年	占全球比例（%）	2003 年	占全球比例（%）	面积增减	增减比例（%）
菲律宾	–	–	<0.1	<1	<0.1	
哥伦比亚	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
保加利亚	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
洪都拉斯	<0.1	<1	<0.1	<1		–
德国	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
印度尼西亚	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
总计	58.7	100	67.7	100	+9.0	+15

资料来源：詹姆斯，2003.

美国在 2003 年转基因作物净增加的面积为 380 万公顷，增加的面积全部是 Bt 和抗除草剂玉米以及抗除草剂大豆。阿根廷尽管受到经济衰退的影响，它的 Bt 玉米的种植面积增加了 3%。加拿大转基因作物在 2003 年增加 26%，达到 440 万公顷，3 种作物油菜、玉米和大豆约增加 100 万公顷。据报道，中国和南非年增长率最高为 33%。中国连续 5 年种植 Bt 棉花面积增加，从 2002 年 210 万公顷到 2003 年的 280 万公顷，占 2003 年全部棉花种植面积 480 万公顷的 58%。南非种植转基因玉米、大豆和棉花面积增加到 40 万公顷。澳大利亚的转基因作物种植面积由于持续干旱而略有减少，约一个百分点，棉花的种植面积约占作物总种植的 1/3。罗马尼亚 2002 年转基因大豆面积较 2001 年翻了三番，达到 4.5 万公顷，2003 年超过 5 万公顷。西班牙 2002 年的 Bt 玉米翻了一番达到 2.5 万公顷，2003 年西班牙 Bt 玉米的种植面积增加了 1/3，达到了玉米总种植面积的 6%。保加利亚种了小面积耐除草剂玉米，而墨西哥也有小面积转基因大豆和 Bt 棉花。2002 乌拉圭种植有大概 2 万公顷耐除草剂大豆，2003 年转基因作物的面积超过 5 万公顷。印度是世界上棉花种植最多的国家。它于 2002

年5月首次批准种植 Bt 棉花，当年共种植了4.5万公顷的 Bt 棉花，2003年 Bt 棉花的种植面积翻了一番以上。哥伦比亚（2002年第一次种植了0.2万公顷的 Bt 棉）以及第一个种植转基因作物的中美洲国家洪都拉斯（2002年第一次种植了0.5万公顷的 Bt 玉米）在2003年的面积都有增长。

至2003年，全球种植的转基因作物仍然主要是大豆、玉米、棉花和油菜。居首位的是转基因耐除草剂大豆，面积为4 140万公顷；居第二位是转基因玉米，面积为1 550万公顷；第三是转基因棉花，面积为720万公顷；第四是转基因油菜，面积为360万公顷；其余的南瓜和番木瓜的面积都不大（表1-3）。

表1-3 全球2002年和2003年转基因作物种植面积（百万公顷）

作物	2002年	所占比例（%）	2003年	所占比例（%）	增减幅度	增减比例（%）
大豆	36.5	62	41.4	61	+4.9	+13
玉米	12.4	21	15.5	23	+3.1	+25
棉花	6.8	12	7.2	11	+0.4	+6
油菜	3.0	5	3.6	5	+0.3	+11
南瓜类	<0.1	<1	<0.1	<1	–	–
番木瓜	<0.1	<1	<0.1	<1	–	–
总计	58.7	100	67.7		+9.0	+15

资料来源：詹姆斯，2003

2003年耐除草剂大豆面积增加13%，约490万公顷。美国80%的种植大豆为转基因抗除草剂大豆，阿根廷98%以上的大豆面积为转基因抗除草剂大豆。全球转基因玉米面积从1996年以来有增有减，总体呈缓慢递增趋势（图1-5）。在2001年转基因玉米的面积全球减少50万公顷，但到2002年又提高了260万公顷，2003年增加310万公顷。面积主要增加为美国，此外阿根廷、南

非和西班牙也都有所增加。洪都拉斯、菲律宾和乌拉圭则第一次批准了转基因玉米的商业化种植。在南非，用作饲料的 Bt 黄玉米 2001 年种植面积为 16 万公顷，到 2002 年提高到 17.5 万公顷，2003 年增加到 20 万公顷，相当于南非黄玉米总面积的 20%。用作食物的 Bt 白玉米在 2001 年第一次种植面积是 0.6 万公顷，2002 年提高了近 10 倍，达 5.8 万公顷，2003 年则达到 8.4 万公顷，占南非白玉米种植面积的 8%。虽然美国转基因棉花比 2002 年减少 5%，澳大利亚基本持平，但中国 Bt 棉花种植面积增加了 70 万公顷，使全球 2003 年转基因棉花面积较 2002 年增加了 6%。

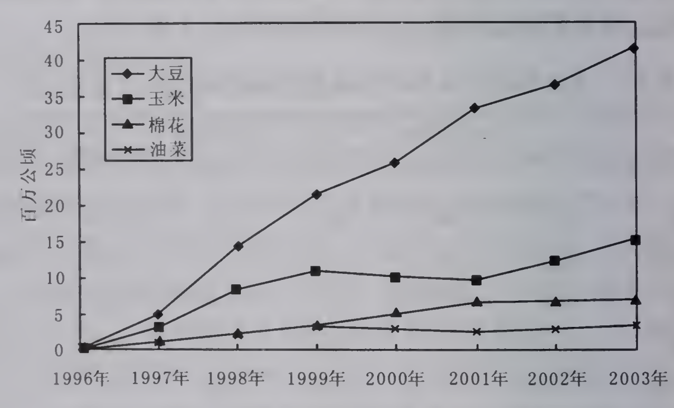


图 1-5　1996～2003 年间全球主要转基因作物的面积

（资料来源：詹姆斯，2003）

转基因油菜从 2002 年的 300 万公顷增加至 2003 年的 360 万公顷，增加的面积几乎全在加拿大。2002 年，加拿大全国 400 万公顷油菜中 259 万公顷已种植上转基因耐除草剂油菜，另外 20% 的面积种植有突变型的耐除草剂油菜，传统油菜面积仅留下 16%。而 2003 年在加拿大 470 万公顷油菜面积中，转基因耐除草剂油菜的面积已达 319 万公顷，另外 22% 的面积为突变型的耐除草剂油菜，传统油菜品种的面积仅剩 10%。

以上4种主要转基因农作物的种植面积与全球同类作物种植面积相比较，转基因大豆种植面积比例最大。与全球大豆种植面积7 600万公顷相比，已占到55%（图1-6），而在2001年时占仅46%，还未过半，2002年时为51%。2003年全球3 400万公顷棉花中转基因棉花有720万公顷，占21%。2003年全球油菜种植面积为2 200万公顷，转基因油菜种植面积为360万公顷，占16%，而2001年时是11%。2003年全球玉米种植面积为14 000万公顷，转基因玉米面积占11%，而2001年为7%，2002年为9%。4种作物全球种植面积为27 200万公顷，其中的25%是转基因作物。

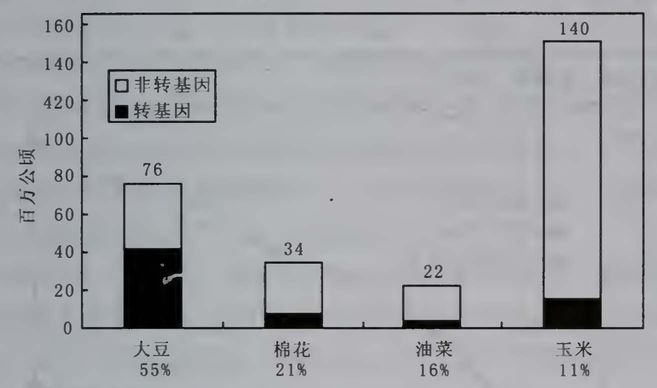


图1-6 2003年4种转基因作物占全球同类作物种植面积比例示意图

（资料来源：詹姆斯，2003）

按转基因性状来分析，1996年到2003年的8年间，耐除草剂性状在面积上始终占绝对优势，其次是抗虫性状（图1-7）。在2002年，耐除草剂的大豆、玉米和棉花占总面积5 870万公顷中的75%（表1-4），而Bt作物为1 010万公顷，相当于17%。转基因耐除草剂与抗虫的双重性状的棉花和玉米占全球转基因作物的8%。2003年与2002年相比较，耐除草剂转基因作物面积增加

550 万公顷,增幅为 12% 。Bt 作物增加的比例达 20% ,面积增加 210 万公顷。增加的主要是 Bt 抗虫玉米,而 Bt 玉米种植面积的增长主要在美国。另外,阿根廷、南非和西班牙的增长幅度也较大。

表 1-4　2002 ~ 2003 年全球按性状分类的转基因作物的面积（百万公顷）

性状	2002 年	所占比例（%）	2003 年	所占比例（%）	面积增减	增减比例（%）
耐除草剂	44.2	75	49.7	73	+5.5	+12
抗虫（Bt）	10.1	17	12.2	18	+2.1	+20
Bt/耐除草剂	4.4	8	5.8	9	+1.4	+32
抗病毒/其他	<0.1	<1	<0.1	<1	<0.1	–
总计	58.7	100	67.7	100	+9.0	+15

资料来源：詹姆斯. 2003

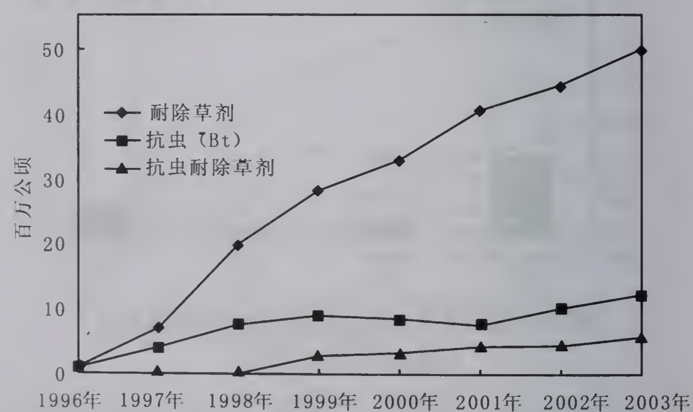


图 1-7　全球 1996 ~ 2003 年转基因作物主要性状种植面积

（资料来源：詹姆斯，2003）

从 1996 年到 2003 年 8 年间，全球转基因作物种植累计面积为 3 亿公顷。转基因作物的市场价值也逐年上升，1996 年时为 3 亿美元，2000 年增加到 30 亿美元，2002 年全球转基因作物的市场价值则为 42.5 亿美元，而 2003 年全球转基因作物的市场价值

估计为 45 亿 ~ 47.5 亿美元，占全球农作物市场 310 亿美元的 15%，占全球种子市场 300 亿美元的 13%。

五、为什么要提出生物安全问题

有关重组 DNA 技术的进展以及其在医药、农业、能源、环保等等方面可能会给人类带来美好的前景大家都已知道，那为什么还要提出生物安全问题呢？任何一件事物往往都会有正反两面，高新技术也一样。如原子能在造福于人类的同时，如使用不当也会给人类带来严重的后果。我们不说核战争，就是乌克兰的切尔诺贝利核电站由于核泄漏造成几万人死亡，十几万人致残，甚至在事过 15 年以后的今天，核辐射还相当严重。

那么转基因生物有什么负面影响呢？在 1992 年联合国通过的《生物多样性公约》中有两个条款对这问题已有了原则的规定，那就是第 8 条"就地保护"（g）款和第 19 条"生物技术的处理及其惠益的分配"3 款。现摘录如下：

"第 8 条（g）款　制定或采取办法以酌情管制、管理或控制由生物技术改变的活生物体在使用和释放时可能产生的危险，即可能对环境产生不利影响，从而影响到生物多样性的保护和持续利用，也要考虑到对人类健康的危险；"

"第 19 条 3 款　缔约国应考虑是否需要一项议定书，规定适当程序，特别包括事先知情协议，适用于可能对生物多样性的保护和持续利用产生不利影响的由生物技术改变的任何活生物体的安全转让、处理和使用，并考虑该议定书的形式"。

转基因生物对环境及人体健康的潜在风险大致有下列几点：

- 转基因植物可能会成为杂草；
- 转基因植物通过基因流对近缘物种造成潜在的风险；
- 对非靶标生物直接和间接的影响，也即对生物多样性的

影响；

- 对土壤生态系统形成的潜在风险；
- 害虫对转基因抗虫植物产生抗性；
- 病毒重组造成“超病毒”；
- 抗生素标记基因等造成食品安全问题。

以上的问题也正是我们这本小册子在后面准备重点介绍的问题。有些人对转基因生物持不同意见的另一个问题是涉及到伦理道德问题。下面首先介绍有关伦理道德问题。

六、关于伦理道德的争论

随着重组 DNA 技术的进展，人胰岛素基因在大肠杆菌中，在酵母中都可表达；人生长激素和人干扰素基因插入到细菌中也早已成功，以上这些都已形成产品，先后在 20 世纪 80 年代先后投放市场；人生长激素基因在鱼、猪、牛等高等动物中也都成功地表达；人促红细胞生成素及人组织血纤维蛋白溶酶原激活剂等等一批人的基因的产物已接近生产阶段或者已投入市场。把转基因生物作为生物反应器，人血清蛋白基因转入马铃薯，这种转基因马铃薯能生产人血清蛋白。据不完全统计，最少已有 24 种人类基因已经引入到各种生物体内。而实际上，目前的技术进展几乎可以将人类基因转移到任何一种生物体中去。由于人体的基因在不同生物体中被任意的转移，有人提出了下列一系列的问题，人类是否有权利任意地把人体基因转移到其他生物中去？当消费者知道了食品中有人类基因后是否愿意食用这类食品？用人类基因做转基因工作有没有一个法定的限制？人类基因任意的转移会不会出现“弗兰肯斯坦”那样的科学怪人，而使人类遭受灾难。归根结底，部分公众担心这样做会侵犯人的权利和尊严。此外，在美国，转基因作物绝大多数被少数几家大的生物技术公司，特

别是孟山都（Monsanto）公司垄断，而孟山都公司的转基因产品是与其销售的生物农药配套使用的，有人质疑，为了获取利润，把整个生物界的遗传结构加以混合或加工是否合法？

> 弗兰肯食品（Franken's Foods），国内也有翻译成“恶魔食品”的。弗兰肯斯坦（Frankenstein）医生是 Marry Shelley 小说中的人物，他创造了一个怪物，但最后这个怪物毁灭了他。弗兰肯食品被用来指在实验室内被科学家制造出来的那些转基因食品。虽然有些恐怖，可能也并不太合适，但反映了一部分公众对转基因食品的态度。

1993 年英国遗传修饰和食品应用伦理委员会针对转基因食品的有关伦理方面提到几点主要的担忧。如将人类参与凝血的蛋白质的基因（IX 因子）转到绵羊等食用动物中，这些含有人类基因的动物又作为人的食品是否合适？将某些宗教团体禁止食用的动物，如猪的基因转入到他们通常食用的动物（如牛、羊）中，将会是什么后果？将动物基因转入食用植物中去，可能会引起素食主义者的关注。用含有人类基因的生物体作为动物饲料也可能引发争议，例如用人类基因修饰过的酵母生产有药用价值的人类蛋白，生产后的废酵母再用作动物的饲料。

此外，人们用人体基因插入到猪的基因组中得到转基因猪，因猪的各种脏器与人体很匹配，具有人基因的转基因猪就有可能被人利用它的脏器来置换病人的脏器，在临床上排斥现象将会缓解得多。但也有不少人从伦理角度考虑得比较极端，他们质疑，即使脏器移植成功，接受脏器的被移植者是人还是猪？

1994 年 11 月在美国华盛顿曾举行了一次不寻常的新闻发布会，美国马哈里希国际大学的一位被国际上公认的、由康奈尔大学培养出来的分子生物学家，当时 46 岁的费根（John Fagan）博士，站在伦理道德的立场上，基于基因工程的巨大危险而反对基

因工程。他本人宣布放弃从美国国立卫生研究院得到的 60 万美元以上的科研资助，他还放弃了从其他来源争取到的 125 万美元的资助，因为他的研究成果会对他认为有害的基因工程的应用作出贡献，他呼吁人们对种系的基因操作暂停 50 年。所谓种系的操作，就是把新的基因引入到精子、卵或非常早期发育的胚胎的 DNA 中去。导入到这些生殖细胞中引起的改变将一代代地传下去。因而，这种被他称为的事故的恶果以及其不可预计的副作用将无限期地存在下去。

1993 年国际上成立了一个由 50 人组成的国际生物伦理学委员会。该委员会来自 32 个国家，由律师、生物学家、遗传学家、哲学家、社会学家、人口学家和政治学家以及 4 位诺贝尔医学奖获得者等人员组成。任务是把遗传学进展可能带来的问题告知公众并传播有关的知识。

第二章 转基因食品安全吗

一、餐桌上的转基因食品知多少

前面已经介绍，主要的作物如大豆、玉米、棉花、油菜等都被转入了外源基因，并进行了大面积的商品化种植，以这些转基因粮食作物为原料制成的食品，即所谓的转基因食品已经深入到我们生活的方方面面。以下面一个菜谱为例，包括了在美国已经批准进行大田试验或商品化的很多转基因食品中的少部分食品（表2-1）。在表2-1中，虽然还有不少农作物还处于大田试验，尚未被批准商业化，但是足以说明在当今生物技术高度发展的社会，如果有人愿意吃一顿完全用转基因生物制成的西餐正餐的话，食物的原料都已经具备了。

表2-1 一个转基因西餐馆的正餐菜单

正餐前的开胃食品	玉米饼片（萤火虫基因）或土豆片（鸡基因） 番茄的沙司（比目鱼基因），胡椒（病毒基因）和洋葱（大蒜基因）
汤和色拉	奶油西兰花汤（细菌基因） 生菜（烟草基因）色拉，radicchio（细菌基因）和黄瓜（烟草基因）
主　　菜	油菜籽油（加利福尼亚月桂树基因）炸鲇鱼（真鳟鱼基因） 大豆（矮牵牛基因）和胡萝卜（矮牵牛基因）的烤蔬菜饼——配着烤马铃薯（蜡螟基因）或茄子（细菌基因）和小麦粉（细菌基因）面包棍
奶　　酪	什锦奶酪（工程细菌凝乳酶）

（续）

甜　　食	新鲜木瓜（病毒基因）水果饼，草莓（某种基因），悬钩子（病毒基因）和瓜（烟草基因） ——配向日葵子（豇豆基因）和胡桃（大麦基因） ——配上从注射有基因工程小牛生长激素（BGH）的牛体内取得的奶油和糖（细菌基因）
饮　　料	冷冻苹果汁（蚕蛾基因） 黑大麦啤酒（某种基因） 白葡萄酒（病毒基因）

注：括弧内为所转入的基因

二、中国有多少转基因食品

据《中国青年报》报道，现在许多中国人的餐桌上都有含转基因成分的食品。2002 年 4 月初，北京检疫部门对进口的炸鸡粉进行检测，确定十多个样品中，有 3 个样品含有转基因玉米成分。几年来，在深圳、连云港等地的港口多次检验出大量进口的转基因食品。有关人士指出，目前我国大量进口的大豆和玉米等产品中，转基因食品占了很大比重，送检样品与实际进口量相比，实在寥寥。

截至目前，据保守估算，在不知情的情况下，进入中国人食物链的转基因食品已经超过 2 000 万吨。目前我国极少生产粮食、油料等转基因食品作物，而对于转基因抗虫棉来说，可能只有很少部分棉籽油被作为食用油，基本上并不进入人的食物链。转基因作物大规模生产并商品化是在 1996 年左右，我国进口转基因产品也是从那时开始的。夏友富等提供了自从 1996 年到 2001 年美国和阿根廷转基因大豆出口量以及我国大豆进口量的数量（表 2-2）。1996 年我国进口转基因大豆等作物 8 万吨，到 1999 年飙升至 280 多万吨，2000 年达到 750 万吨，2001 年则超过 1 000 万

吨。短短五、六年内，进口转基因作物增长100多倍。这个数据是如何测算出来的呢？据有关专家介绍，我国每年进口大豆、玉米等作物的数量和来源是明确的，而在美国、阿根廷等主要转基因作物出口国的生产情况和占总产量的比例也是已知数，取其出口到我国的转基因作物为其国内的平均值，建立一个测算模型，即可得出以上数据。另据一些专家指出，其实这是非常保守的数据，因为如果出口国可能会有意识地倾销其转基因产品到转基因检测和管理比较薄弱的国家的话，我国进口的粮食或原材料中转基因作物所占比例可能远远超过出口国的国内平均比例。我国进口的作物主要是大豆、玉米、油菜，而且主要来自美国、阿根廷等商品化种植转基因大豆、玉米、油菜等作物的国家。

表2-2　美国和阿根廷转基因大豆出口量以及我国大豆的进口量（万吨）

年份	世界转基因大豆出口量	美国转基因大豆出口量	阿根廷转基因大豆出口量	中国转基因大豆进口量	中国大豆的进口总量	进口的转基因大豆占进口总量的比例	中国大豆自产总量
1996	42	39	2	1.38	110	1.26%	1323
1997	360	343	10	30.77	289	10.65%	1474
1998	880	714	136	80.02	320	25.01%	1515
1999	1500	1158	200	164.3	378	43.47%	1425
2000	2250	1468	705	557	1042	53.46%	1541
2001	2800	2048	686	899	1394	64.49%	1541

资料来源：夏友富，杨昌举. 2003. 进口转基因大豆对我国生物安全的可能影响及对策研究. 中国产业发展研究，120～133页

目前我国进口大豆主要用作加工原料，生产豆油、豆腐、豆奶等制品。据推算，在国内用转基因大豆生产的大豆色拉油比例相当高，可能高达80%以上。因此可以这么说，我国的转基因食品基本上是直接或间接来自进口的，我们吃的豆油、豆腐、油菜籽油、玉米油以及添加少量大豆或玉米等成分的食品都有可能含有转基因成分，或直接来自转基因生物。2002年3月20日农业

部颁布强制标签转基因食品的规定一年多以来，直到2003年7月中旬，“绿宝”大豆色拉油开始标签转基因产品（图2-1），其后，许多知名品牌的大豆色拉油也纷纷标签“生产原料为转基因大豆”（图2-2）。虽然标识加工原料为非转基因大豆的豆腐产品在超市里有一些，但其他各种大豆制品（如豆腐皮、豆浆等）以及市场上销售的大豆等还无任何标识，并且由于国内没有进行相关调查，转基因食品在我们生活中的具体比例尚不清楚。



图2-1　2003年7月中旬，“绿宝”色拉油率先标注“加工原料为转基因大豆”

（当时这个标签可能是临时加上去的，略显粗糙，而且位置在油桶的侧面，为了醒目，作者将其移贴到正面。相比较而言，以后的标签就精细多了。）

最近国内的一些媒体报道了绿色和平组织在北京超市货架上的雀巢食品——美极翡翠白玉汤中检测出转基因成分的消息以来，转基因食品的安全性以及生物安全管理问题引起了公众的广泛关注。媒体及公众纷纷谴责雀巢公司侵犯消费者的知情权以及

在欧洲和中国大陆采取双重标准，但根据农业部的转基因生物安全及转基因食品标识管理的规定，雀巢公司的做法并不违反有关的法规。原因是在农业部颁发的转基因食品强制标识的名单中仅包括大豆种子、大豆、大豆粉、大豆油、豆粕、玉米种子、玉米、玉米油、玉米粉、油菜种子、油菜籽、油菜籽油、油菜籽粕、棉花种子、番茄种子、鲜番茄、番茄酱等，不包括含转基因成分的其他种类的食品，这样一来强制雀巢标识转基因食品就无法可依了。这就又涉及到转基因食品的强制标签问题，将在后面进行讨论。



图 2-2　继“绿宝”色拉油进行转基因标签以后，超市里标志“加工原材料为转基因大豆”的其他部分品牌的色拉油产品（标签的字体很小需要仔细辨认。除左下方的色拉油标注为“本产品为转基因大豆加工制成，但产品中已不再含有转基因成分”外，其余均标注为“加工原料为转基因大豆”。）

包括上述所谓的雀巢事件在内，国际上近期发生了一些令人瞩目的事件，更引发了人们对转基因食品安全的争论，下面将作简要的介绍。

三、与转基因食品安全性有关的几个事件

1. 转基因马铃薯事件

继公开在电视上宣布转雪花莲外源凝集素（GNA）基因马铃薯对大鼠的内脏器官有损害后，Ewen 和 Pusztai 于 1999 年正式发表了他们的研究结果。他们研究了转 GNA 基因抗虫马铃薯对大鼠胃肠道不同部分的影响，包括胃、空肠、回肠、盲肠和结肠等。实验分别用含有转基因马铃薯、非转基因的马铃薯亲本以及非转基因马铃薯加上 GNA 的三种膳食来饲喂实验大鼠，每种膳食又分为生的和熟的两类。实验分析表明生的转基因马铃薯的 GNA 表达水平为 25.4μg/g 干重，煮沸 1 小时后降低到 4.9μg/g，饲喂实验进行 10 天后，对大鼠的胃肠道进行组织学观察，结果发现胃黏膜、空肠绒毛以及肠道的小囊长度均有不同程度的变化。

Pusztai 一公布他和同事们的转 GNA 基因马铃薯会损伤大鼠的消化和免疫系统的研究结果，其实验设计和实验结果马上遭到多方批评。对于该篇论文中存在的问题，有关学者认为有以下几点：①论文中没有介绍饲喂大鼠的不同膳食的成分，虽然 Pusztai 等在网上公布了部分细节，转基因马铃薯中的淀粉、多聚葡萄糖、外源凝集素、胰蛋白酶和糜蛋白酶与其余亲本品系不同，但这种不同是由转基因引起的还是由品系不同而引起的尚未可知；②大鼠膳食中仅含 60% 的蛋白质，容易造成饥饿反应，从而导致其他的一些不利影响；③实验设计不严密，每个饲喂组的大鼠个体数太少，而且缺少膳食对照，比如一个含 15% 蛋白的标准的啮

齿动物膳食，以及包含“空白”载体的马铃薯的对照膳食；④研究中没有观察到一致性的变化，很难说明实验中大鼠消化道的变化是转基因马铃薯影响的结果。表 2-3 中，摄食马铃薯本身也会导致消化道适应变化，支持上述等的批评。但是 Pusztai 等最近撰文，坚持其研究结论的正确性。

2. 星联（Star-Link）玉米事件

2000 年 9 月 18 日，《华盛顿邮报》报道了在著名的卡夫（Kraft）食品公司生产的 Taco 玉米饼皮中检测到了 Bt Cry9C 杀虫毒蛋白（图 2-3），9 月 22 日卡夫宣布收回其在市场上的三种 Taco 食品。这种能够表达 Bt Cry9C 杀虫蛋白的转基因玉米，由安万特作物科学公司（Aventis CropScience）开发，该公司是一个作物保护公司，从事作物改良的研发业务，其中安万特公司占 76% 的股份，先灵公司（Schering AG）占 24%。玉米种子的生产则由加斯特（Garst）等种子公司来进行，并以星联的商标进行出售。这种转基因玉米表达的杀虫毒蛋白是其他 Bt 品种的 50 ~ 100 倍，容易引起人体的过敏反应，所以只被批准用于动物饲料而不能用于人类食品。事情发生后，使安万特蒙受近 10 亿美元的损失。迫于巨大的经济压力，2000 年 11 月安万特宣布将出让安万特作物科学公司，2001 年 10 月，它们与拜尔（Bayer）公司达成转让安万特作物科学公司的协议，并已于 2002 年 6 月完成转让。星联玉米事件严重影响了美国玉米的出口，例如，美国玉米对欧洲的出口额从 1996 年时的 3 亿 5 百万美元降到 2001 年时的 2 百万美元，对韩国的出口从 3 亿美元降至 8 千 5 百万美元。

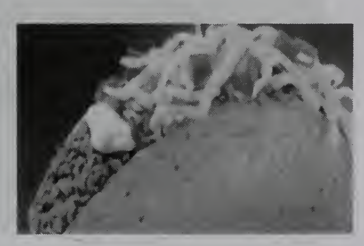


图 2-3　一种墨西哥食品——Taco Shell Bell，外面的玉米饼皮可能来自转基因玉米



图 2-4　在香港市场上被检测出含转基因成分，但未进行转基因标签的雀巢部分产品
（绿色和平组织，施鹏翔提供）

3. 雀巢事件

2002 年 11 月 29 日，上海的《外滩画报》报道了一个惊人的消息，6 种雀巢公司食品含有不明基因，它们是：雀巢甘脆朱古力，百福豆浆（百福是雀巢公司的牌子），百福高钙豆浆，雀巢婴儿纯米粉（苹果味），凤仙雪条和百福豆腐花（部分产品的图片见图 2-4）。2002 年 12 月 6 日，《北京晨报》报道收到香港绿色和平组织一份检测报告，报告显示，在北京超市里购买的“美极翡翠白玉汤”的汤料中存在外源转基因（图 2-5）。起因是一种转基因抗除草剂大豆（图 2-6），由美国孟山都（Monsanto）公司开发和销售。在此后的一段时间里，国内的新闻媒体尤其是在互联网上展开了对转基因食品安全性的大讨论。实际上，亚洲市场上的部分雀巢食品含有转基因成分早已是不争的事实，只是大家没有注意罢了。更让大家感到愤慨的是雀巢在欧洲承诺不使用转基

Date of Receipt　: May 25, 2002
Testing period　: May 26, 2002 – May 30, 2002
Sample description　: Name: 美极翡翠白玉汤 Bean Curd & Vegetable Soup
Barcode: 6917878002798
Net Weight: 35g x 1
Expiry Date: 3/8/2003

OK

“美极翡翠白玉汤”鉴定结果

Test requested:
Qualitative analysis (S[illegible]ing for the presence of genetically modified materials in food)

Results:

外源转基因表达启动子

35 S promoter gene sequence	Positive 阳性
NOS terminator gene sequence	Negative
Roundup Ready-specific gene sequence	Positive 阳性
Bt endotoxin-specific gene sequence	Negative

美国 Monsanto 公司开发的抗除草剂基因

图 2-5　购于北京某超市雀巢公司的“美极翡翠白玉汤”转基因成分鉴定结果的部分传真图像
（中国香港绿色和平组织，施鹏翔提供）

因，但在中国却在没有标识的情况下大量销售。因为在欧盟国家，公众普遍反对转基因食品，所以欧盟对转基因食品的要求比较严格。而中国政府的有关转基因标签的管理条例并不包括像雀巢食品一类的“终端”食品，刚开始对食品生产原料要求强制标签，而且当时尚未进行实际上的实施，况且多数中国老百姓可能还并不知道或根本未听说过转基因食品，或者知道一些，但对转基因食品不反感，反而可能喜欢像转基因一类的“高科技”的东西。2002 年 12 月底，在事实和社会舆论压力下，雀巢终于承认其在中国的食品可能会存在转基因成分。同时，有关方面也确认雀巢这样做并不违反现行的任何管理规定。图 2-5 给出了购于北京超市的雀巢牌“美极翡翠白玉汤”汤料中转基因成分的鉴定结果。检测由香港基因晶片开发公司完成。根据检测结果，该汤料中存在花椰菜花叶病毒（CaMV）35s 启动子和孟山都（Monsanto）公司开发的抗除草剂基因，说明其加工原料含转基因成分。



图 2-6　由美国孟山都（Monsanto）公司开发的抗除草剂转基因大豆（Roundup Ready）田间照片

（照片由绿色和平香港办事处提供）

4. 药用转基因玉米混进美国大豆事件

2002 年 10 月，美国农业部在内布拉斯加州（Nebraska）刚收获的大豆中发现混入了少量的转基因玉米的茎叶，该种玉米是作为植物反应器生产一种能够治疗疑难病症的胰岛素蛋白的，此事件对美国政府以及美国公众的震动很大，因为如果携带生产某种药物的转基因的花粉传播到正常的作物的柱头上，就会使得正常的粮食受到污染，药物会通过种子（如玉米）进入人类的一日三餐中，正常人就可能在日常饮食中在不知情的情况下被迫吃到这些不需要服用的药物，普通人一想到这些可能就会感到恶心和恐惧。美国政府将被污染的大豆全部销毁，并要求有关单位保证

不再发生类似情况。事件过后，很多人产生了这样的疑问：如果不能保证将大豆和玉米分开，那么能够保证把转基因的和非转基因的玉米分开吗？图 2-7 是一个描述生产药物的转基因玉米示意图。那些平日里散发诱人芳香的金黄的玉米粒，如今变成了一粒粒的药丸，含有能够治病救人的成分。



图 2-7　生产药物的转基因玉米示意图
（图中一些玉米粒被画成医用口服胶囊或药片，来源：www. ucsusa. org）

5. 抗除草剂转基因大豆（Roundup-Ready）基因组中的不明基因片段

比利时农业研究中心的一个研究小组在孟山都公司的抗除草剂转基因大豆（Roundup－Ready）基因组中发现了一段既不属于原来大豆的基因，也不属于外源转基因的 DNA 片段（图 2-8），位于插入基因的旁边，而且该序列比较稳定，在不同世代间没有差异。研究人员推测，该片段来源于转基因过程中的重组或者大片段的缺失。现在尚不了解该片段的功能，有人担心认为在逆境

压力下，该 DNA 片段有可能影响植物蛋白的表达从而会对大豆的品质产生影响。

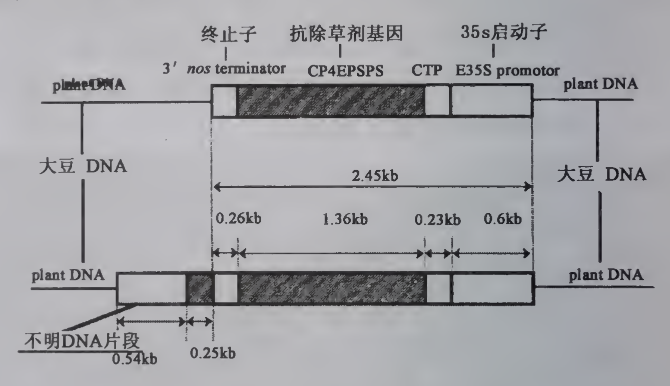


图 2-8　RR 大豆中的不明 DNA 片段

（上图为孟山都公司在文献中报道的转基因插入情况，下图为研究人员新近发现不明 DNA 片段的情况。资料来源：Eur Food Res Technol，2001，213：107 ~ 1122）

6. 对人体过敏的转基因大豆

该转基因大豆是美国先锋种子公司（Pioneer Hi-Bred）的成果。由于巴西坚果的蛋白质含有人和动物营养的最主要的一种氨基酸——蛋氨酸，这种蛋白质的编码基因转入大豆的目的是为了改善其营养组成。但是研究表明该转基因大豆会使对巴西坚果过敏的人群产生过敏反应，因此，公司放弃了商品化该转基因大豆的计划。

研究者取了 9 个对巴西坚果有过敏史的人的血清，RAST 研究表明转基因大豆提取物可有效地与来自生巴西坚果的蛋白提取物竞争性地结合过敏人群血清中的 IgEC（免疫球蛋白），而用与之遗传上相对应的非转基因大豆的蛋白提取物则观察到抑制现象；SDS－PAGE 研究表明，转基因大豆中出现了一种新的蛋白质

带（约9kDa），巴西坚果也有这条带，并且与部分纯化的2S-清蛋白有相同的迁移率，而非转基因大豆中都没有这样一种相对应的带（图2-9）；免疫点杂交研究表明，9份血清的8份能识别部分纯化的2S-清蛋白，也能与巴西坚果提取物中的9kDa的蛋白产生免疫反应，9份血清中的7份能识别上述转基因大豆中与巴西坚果2S-清蛋白有共同迁移率的9kDa的蛋白质，没有血清与非转基因大豆中低分子量的蛋白反应，来自对照的血清不与任何大豆或巴西坚果的蛋白发生反应，因此可以肯定这种转基因大豆中存在与巴西坚果类似的过敏原。

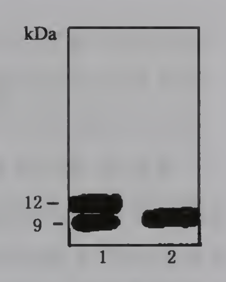


图2-9　转基因大豆与巴西坚果蛋白电泳谱

1. 转基因大豆中9kdA 2S-清蛋白和12kdA中间产物，2. 巴西坚果中2S-清蛋白

从上面的几个事例可以看出，转基因食品的安全性方面还存在一些尚无定论的问题。提示着我们在食用转基因食品时需要谨慎的态度。美国是世界上转基因作物种植面积最大的国家，但政府在安全性问题上还是非常慎重。例如，由于怀疑抗虫基因的表达产物对人体可能有一定的致敏性，上面提到的星联（Starlink）玉米在美国只能用作饲料，而不能作为人类的食品。当然，大多数人吃了这种玉米做成的食品可能不会产生严重的不良反应。另外，是否消费和接受转基因食品，不同的人可能会有不同的看法，也就有了不同的选择。在2004年10月一次新闻发布会上，世界卫生组织（WHO）副总干事Kerstin Leitner说："当前，我们没有证据表明食用含有转基因成分的食品是危险的，但是我们也不清楚这些食品是否会带来危害。因此，我们必须承认我们现在不清楚转基因食品对人类健康的危害性。"（国外生物安全信息，总第19期，11～12）

四、你敢吃转基因食品吗

苏格兰 Rowett 研究所（RRI）的一项研究表明，一种抗虫转基因马铃薯所产生的雪花莲外源凝集素能够对大鼠的内脏器官和免疫系统产生损伤，而对于人类来讲，类似的影响可能会导致癌症发病率和死亡率的大幅上升。虽然有关科学家及科学团体在此项研究的实验设计和结果分析上存在很大分歧，有的支持，有的反对，但其研究结果经媒体公布后影响非常之大，其主要研究责任人普斯塔伊（Arpad Pustztai）被迫提前退休。

转基因食品开发者或者说基因工程技术的拥护者非常急于向公众表达这样一个意思，即现在的作物都是经过人类活动驯化而来，与转基因技术间没有区别，转基因技术只是加速了这个过程。但是，人工选择和驯化是一个长期的过程，在这个过程中，植物获得的是来自同种植物的优良特性，并且在一代代的筛选与耕种的过程中得到进一步的优化，品种特性稳定，任何不利于人类身体健康的畸变都在驯化过程中逐步淘汰掉。而转基因技术或说基因工程技术就不一样了，它有时转入的可能是不同种或者是来自微生物和动物甚至人类的基因，常规育种条件下，这些基因无论如何也不会进入植物体内（既使有，也会是自然界中的一个漫长的进化过程），而且转基因的过程及操作也会导致某些有害效应，而获得作物在短短的时间内就要作为食品进入人类的食物链，不能与人类长期的驯化过程相比。转基因生物尤其是转基因食品的安全评价应遵循个案的原则和审慎的原则。

由于转基因食品还存在上述的一些问题或者说是争论，很多人，特别是欧洲公众对转基因食品的安全性还存在怀疑，自觉或不自觉地抵制转基因食品。虽然，目前还无法对转基因食品是安全的还是不安全的做出定论，但是消费者至少应该知道，所购买

的或市场里的食品是否来自转基因食品，是否还含有转基因成分。为了保护消费者的知情权和选择权，最好的办法可能是对转基因食品进行标签。虽然有人认为，置食品中的其他成分或原料不顾，单单要标签转基因加工原料（成分），是不公平的，但是从加强生物安全管理，慎重对待转基因食品这个新生事物的角度出发，标签是非常重要和关键的环节，不容忽视。

五、转基因食品的标签

自 1994 年世界上第一例转基因西红柿投放美国市场以来，各种转基因食品发展迅猛。但与此同时，对转基因食品安全问题的争论也一刻没有停止。由于外源基因表达的毒性蛋白以及由外源基因的插入而改变受体基因的表达从而使得受体成分的改变可能会对人体健康产生影响，因此，源自转基因生物的食品的安全性备受关注。由于目前大多数的农作物都进行了这样或那样的遗传修饰，尤其是携带各种转基因的几大主要的农作物——大豆、玉米、油菜和棉花已经进行了多年的商品化种植与贸易，在种植或在运输、贮藏、加工过程中都很有可能受到转基因成分的污染，所以大量的农产品需要检测和标识，以说明产品中转基因成分的状态。

在这里，标签是指在食品或饲料产品的包装上贴加标识以说明该产品是否来自转基因生物或是否含有转基因成分。有些时候，受转基因成分的污染是不可避免的，在大多数情况下，农产品的生产商不能保证其产品百分之百地不含转基因成分。为了寻求一种妥协的解决办法，将产品中的转基因成分进行限量规定，即大于某一含量的即需要标签。中国及大多数国家和地区组织基本上都认识到对来自 GMOs 的食品进行标签意味着对公众的尊重，并实施了对转基因食品进行强制性标签的法规以维护消费者的知

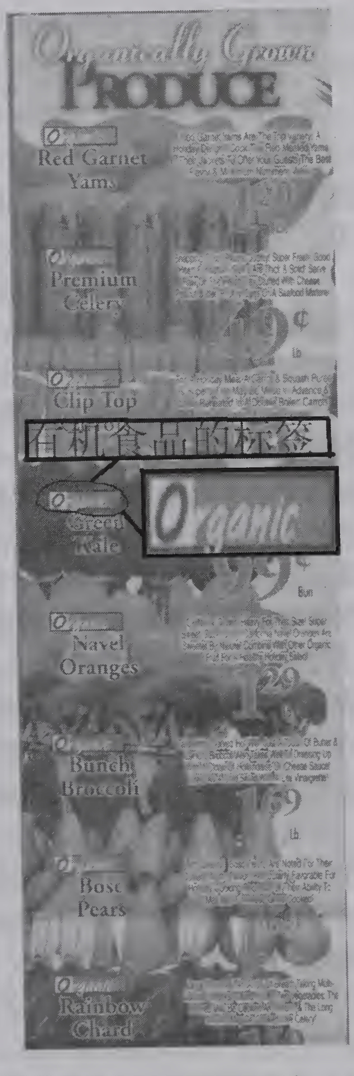


图 2-10　美国超市里有机食品的广告

情权。虽然美国政府尚未采取强制标签制度，但已明确规定所谓的“有机（organic）食品”（图 2-10 ）中不包括使用农药、化肥以及含有转基因成分或产品的食品。

在众多的国家与地区组织中，欧盟对转基因食品的标签要求比较严格，要求食品或饲料中转基因成分超过 0.9% 就必须要标签。韩国政府将标识转基因食品的上限定为 3%，而日本政府将食品中已经商业化的转基因成分的标签标准定为 5%，将食品中未商品化的转基因成分的标签标准定为 1%。中国政府虽然出台了转基因食品强制标签管理办法，但对转基因成分的含量没有规定，这就可能理解为对转基因成分的“零容忍”，即不管终产品中转基因成分含量是多么小，或者只要是来自转基因生物就必须标签。利用中国的自然环境优越的优势，生产出非转基因的无污染的“有机食品”将会提升我国农业在世界范围的竞争力。据报道，国产转基因大豆在国际期货市场上的价格在农业部 2002 年 1 月颁布实施《农业转基因生物进口管理办法》

后，曾经大幅上扬，美国大豆的价格下降。这种现象值得我们深思。最近，国家制定了大豆振兴发展计划，并有意发展非转基因大豆，这是一个好消息，能够在充分保障世界人民身体健康的同时，获得最大的经济效益。

如前所述，农业部规定第一批实施标识管理的包括有大豆种子、大豆、大豆粉、大豆油、豆粕；玉米种子、玉米、玉米油、玉米粉；油菜种子、油菜籽、油菜籽油、油菜籽粕；棉花种子；番茄种子、鲜番茄和番茄酱。农业部发布的《农业转基因生物标识管理办法》规定，转基因动植物（含种子、种畜禽、水产苗种）和微生物，及其产品，含有转基因动植物、微生物或者其产品成分的种子、种畜禽、水产苗种、农药、兽药、肥料和添加剂等产品，直接标注“转基因××”。转基因农产品的直接加工品，标注为“转基因××加工品（制成品）”或者“加工原料为转基因××”（如图 2-1 和图 2-2 中对大豆色拉油的标识）。用农业转基因生物或用含有农业转基因生物成分的产品加工制成的产品，但最终销售产品中已不再含有或检测不出转基因成分的产品，标注为“本产品为转基因××加工制成。但本产品中已不再含有转基因成分”或者标注为“本产品加工原料中有转基因××，但本产品中已不再含有转基因成分”（如图 2-2 中最左下角的一个标识）。按照规定，生产厂商要在标识上把产品的基本情况介绍清楚。而消费者在购买转基因食品时，可向经销商询问该商品的性能、质地、有效期限、生产厂商等问题，经销商有责任、有义务向消费者说明情况。消费者如果吃了没有贴有标识的转基因食品，则可向卫生、工商等职能部门举报。根据农业部发布的《农业转基因生物安全管理条例》的规定，对违反者可没收其非法销售的产品和违法所得，并处以 1 万元以上，5 万元以下的罚款。该管理办法于 2002 年 3 月 20 日起实施。

六、转基因食品安全的评价标准和方法

1. 实质等同性原则

1993 年，经济合作与发展组织（OECD）提出了食品安全性评价的原则——实质等同性（substantial equivalence）原则。即如果一种转基因食品与现存的传统同类食品相比较，其特性、化学成分、营养成分、所含毒素以及人和动物食用和饲用情况是类似的，那么它们就具有实质等同性。实质等同性的确定说明了这种新食品与非转基因品种在有益健康方面可能是相似的。为了方便应用，这个原则考虑了 3 种情况：①转基因食品与传统的同类食品有实质等同性（比如，转基因植物中插入表达病毒外壳蛋白的基因或者导入一个与植物中的已经存在的蛋白类似的但能选择性地抗除草剂的基因）；②除了插入的特性（如导入 Bt 毒蛋白基因而得到的抗虫特性或导入一个新蛋白而产生的抗病特性）以外，转基因食品与传统的同类食品有实质等同性；③转基因食品与传统的同类食品不存在实质等同性（例如，转入的某个基因或多个基因编码某种特性，从而显著地改变了用作食物或饲料的植物，比如产生某种新的油类或碳水化合物）。

转基因的实质等同性一般是与传统的同类食品相比较而言的，随着可食用转基因植物的释放，传统的同类食品这个类比参照物的概念的外延将会扩大，所以实质等同性是个动态的概念。而一旦确定了某转基因食品与其传统同类食品的实质等同性，就认定该转基因食品与其传统的同类食品一样安全。对于实质等同性的第二种情况，即除了插入特性以外与传统的同类食品具有实质等同性的转基因食品，进一步安全评价的焦点应放在插入基因的产品上。评价的方法应以个案（case-by-case）为原则，以已知的有关知识及所导入的基因和基因产品的特性为基础。当插入基

因表达的蛋白可以很快地被消化并且不来自任一已知的过敏源时，并不需要对该蛋白的安全性作进一步的分析，而一个蛋白的消化比较困难时，其细胞学功能就必须进行安全评价。另外，难于消化可能是潜在毒性和过敏性的一个指示。需要指出的是，在经过一系列的分析后才能确定是否需要进一步的安全测试。当进行动物饲喂测试时，目标应当明确，实验设计应当细致。

若仅仅因为一种新的转基因食品同一种现存的对应食品不存在实质等同性并不意味着它就是不安全的。如果进行安全测试，就必须要以这种新食品的特性为基础。依照其化学成份以及对其熟知的程度，可以推断是否需要动物实验和离体研究，并不是所有的转基因食品都需要进行动物实验的，评价必须以个案的原则为基础。如果需要用转基因食品或其成分进行动物实验，那么实验目的也必须是明确的，设计是严谨的。

2. 评价方法

（1）常用的评价方法　在美国，有很多的基因公司，孟山都公司是其中最大的一家，该公司的资本已经渗入到许多拥有商品化转基因食品的公司里。该公司在食品安全评价方面的经验值得借鉴。孟山都公司根据实质等同性原则将评价的内容分为三个方面：

1）插入基因所表达蛋白的安全性评价：①所表达蛋白的生物学活性要确定，并且一旦被人体吸收后，所表达蛋白不会带来不能够被接受的健康风险；②所克隆基因的来源和基因序列也要确定；③所表达蛋白的氨基酸序列应当与基因序列预测的结果相同；④在植株的可食组织中，克隆蛋白的表达水平应当确定；⑤所表达蛋白的氨基酸序列应当不与已知的过敏原或毒素相关；⑥在胃肠道中，表达的蛋白可被蛋白酶很快地降解；⑦当以加大的剂量饲喂小鼠时，该基因的蛋白产物不能对小鼠有毒性。

2）转基因食品的重要营养成分要与相应的非转基因品系以及其亲本的进行比较，分析结果要与现有的数据进行比较，以确定其营养水平在正常的范围之内，抗营养成分也要与现有数据和其对照比较以确认内源毒素没有发生有意义的变化，食品加工产品各种成分也应进行分析，以保证所测定的参数在可接受的范围之内。

3）用作转基因食品的作物和其对照品系应在相同时间和相同地点种植，用来比较它们饲喂实验动物时的健康情况。一般地，为模拟商业化的饲喂实践，这些饲喂实验用家畜家禽进行。对于人类食用的食品来讲，就将这种新食品用 25 倍于人类最大估计摄入量去饲喂大鼠，实验用每组每种性别的大鼠进行 4 周以上。对于全食物（whole food）饲喂研究来说，建议用转基因马铃薯、蕃茄等食物再加上大鼠的典型饮食来饲喂笼养大鼠。同时要分析转基因和非转基因饮食的近似成分（蛋白、脂肪等），啮齿动物的典型膳食一定要有相似的氮量。全食物饲喂实验时，动物对食物的微小变化不敏感，健康显示测试的参数包括每日健康观察、每周体重、食品消耗等，4 周后进行全面的尸检，如果在尸检中发现任何异常，这些组织就要进行显微镜检。这种 28 天的急性毒理学研究通常用来评价是否在饲喂待检食品过程中，有任何不利的影响表现出来，在尸检中，应该观察器官重量、血液学、临床化学以及组织病理学等方面的变化。

然而，用全食物饲喂动物的实验有一定的局限性，它很难检测出食品中的微小变化。国际食品生物技术委员会（IFBC）指出，一般情况下不推荐使用这个方法评价转基因食品的安全性，如果确实需要，那么全食物饲喂研究的实验设计要十分小心和谨慎，并且持续时间不能太长，以避免因营养不平衡等因素的影响而对动物产生不利影响，从而掩饰了转基因食品的安全性。实际上，上述经验和结论来自对辐照食品安全评价的实验结果。当

时，不了解以某种食物过量饲喂实验动物会导致营养的不平衡，对动物的健康产生不利影响。表 2-3 总结了一些这样的例子，可能对转基因食品的评价工作有一定的参考价值。营养不平衡和转基因食品本身对实验动物的不利影响往往很难区分，因此分析食品的成分，比较营养价值成分和有效成分的水平，才可能对评价转基因食品的潜在影响具有重要价值。

表 2-3　用全食物饲喂动物而导致不利影响的例子

食品种类	不利影响的结果
洋葱	大鼠和狗用含 35% 洋葱（干重）的食物饲喂后，都由于红细胞的溶血作用而患上贫血症。90 天饲喂大鼠，出现脾、肝、肾的色素沉淀
马铃薯	大鼠用煮熟的马铃薯饲喂 17 天后，其盲肠变大。大鼠吃了大量的被修饰过的淀粉后，结肠也变大
小麦粉	膳食中含 35% 的小麦粉，饲喂大鼠后，其后代繁殖能力下降，在慢性研究中，大鼠的存活也显著下降
番茄	每天用每千克体重 30 克体重的番茄酱饲喂大鼠 4 周，其胃黏膜坏死或糜烂
菜豆	用菜豆饲喂大鼠 12 周后，大鼠患上肺气肿
干辣椒	用 10% 的干辣椒溶液饲喂大鼠 4 周，其十二指肠黏膜发生损伤
昆士兰果	摄取昆士兰果后，狗持续 12 ~ 24 小时产生发烧、半瘫、跛的现象

资料来源：自然资源学报. 2001，16：184 ~ 190

辐照食品是指经过伽玛射线和电子束等射线进行辐射处理的食品，辐照处理能够达到食品保鲜、杀灭细菌和延长储存期等作用。在国内，包括大蒜、米、土豆、洋葱、花生、蘑菇、香肠、苹果等计 18 种辐照食品已经通过卫生部批准。

（2）数据库　数据库可以提供有关食品成分的本底信息，用来评价转基因食品中主要的营养和毒素是否有显著性变化。当然也应考虑到这些主要的营养和有毒成分有一定的变动范围，另外必须保证数据的质量，并且必须发展有效的方法来定量这些主要的成分。

在荷兰，有关天然毒素成分和调味香料的200种食品植物的数据已经输入数据库，这个数据库计划要包括现今在欧洲使用的300种食品植物的信息，而现在世界范围内主要有600~700种食品植物。

（3）活体和离体动物模型　可以用活体或离体的动物模型来评价转基因微生物食品的安全性，如表2-4所示。抗生素的应用是为了干扰正常的具有防护性的菌群，以允许新的细菌的进入。

表2-4　哺乳动物肠道模型

	大鼠	小鼠	猪	人类
传统的	+	+	+	
诺复杀星处理	+	+	+	−
链雷素处理	+	+	−	−
无菌	+	−	−	*
两阶段恒化器	+		+	+

注：+已经建立模型，−尚未建立的模型，*与人类排泄物中菌群有关的一个无菌大鼠模型在1995年建立。

资料来源：自然资源学报，2001，16：184~190

从表2-4中可以看出，大鼠模型建立的最齐全，可能是研究中应用大鼠模型较多的缘故。无菌大鼠模型除了可以研究细菌的存活和移殖外，还可以研究微生物间遗传物质的转移。如果将携带质粒的供体菌系和受体菌喂服无菌的大鼠，几天后在大鼠的排泄物中就会发现DNA接合转移的产物。

（4）转基因食品致敏性的评价方法　如果转基因食品中所含

蛋白是已知来源的，就在点免疫反应后，进行放射性致敏吸着剂抑制反应测试（RAST - inhibition），如果结果是阳性的，就不需要进一步的试验而下结论，认为这种转基因食品对人类是致敏的；如果结果是阴性的，那么接着进行皮刺测试（DBPCFC）和双盲（double-blind）、安慰剂对照的食品免疫试验（placedbo-controlled food challenges），如果结果仍是阴性的，那么就可以下结论，这种转基因食品对消费者来说没有风险。

如果转基因食品所含蛋白是非食品来源，或来源于不常见食品，那么就不能用过敏个体或者他们的血清进行测试，在这种情况下，就必需将这种蛋白的特性与已知的食品过敏原进行对照。

七、如何检测转基因食品

目前欧盟对转基因食品的管理比较严格，所以我们以欧盟的转基因食品检测为例进行介绍（图 2-11）。一般认为，比较可靠的转基因食品检测方法是直接检测其所含 DNA 成分，检测过程一般是这样的：首先是抽取一定数量的样品，提取样品的 DNA。由于目前大多数转基因生物使用花椰菜花叶病毒（CaMV）的 35s 启动子，所以检测的第一步一般是用 CaMV 的特异引物进行扩增，如果是阳性反应就说明样品含有转基因成分，然后用目前已经知道的并已经被商品化的所有转基因的引物进行定量的扩增，根据转基因成分的含量并依据所规定的标签阈值进行标签。在欧盟管理体系中，如果所含成分已经批准商品化并且含量小于 0.9%，可以不标签；或者如果所含成分没有被批准进行商品化，但即将进入商品化或被认为比较安全的，并且含量小于 0.5% 的，也可以不用标签。如果所含转基因成分没有被批准商品化，虽然安全性比较可靠但含量大于 0.5% 或其安全性不明确，属于非认可食品，是禁止上市销售的。

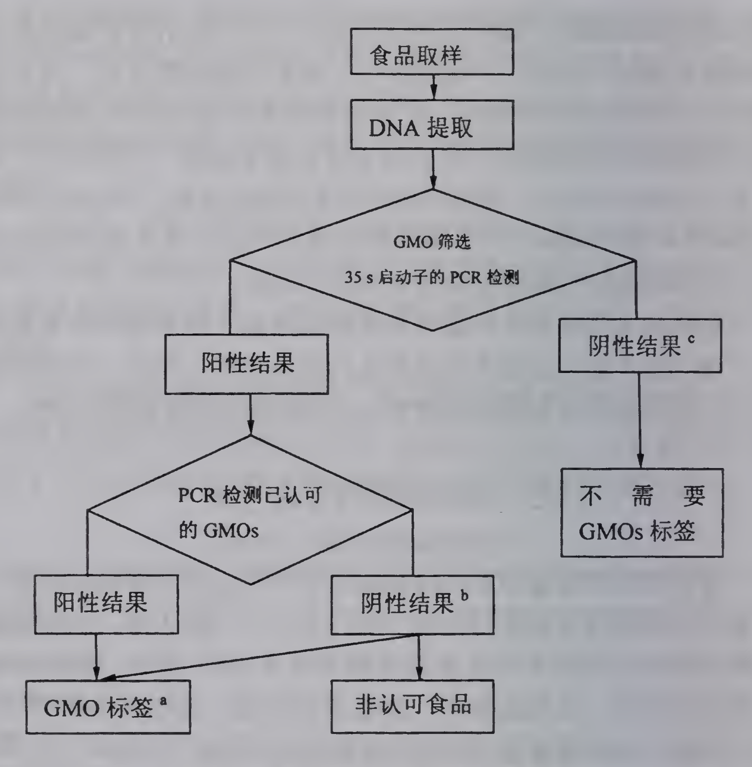


图 2-11　欧盟转基因食品的检测流程

a：欧盟从 2002 年 10 月起，凡 GMOs 含量大于 0.9% 的食品必须标签，b：如果没有检测到认可的 GMOs，必须检查样品中是否含有 CaMV，如果该成分是非认可的商业化的成分但安全委员会对该 GMOs 的评价较好的，且含量小于 0.5%，就可以不进行标签；c：必须检查样品 DNA 中是否含有 PCR 的抑制子。（来源：自然资源学报，2001，16：184～190）

我们认为，进行转基因食品的安全性实验时一定要谨慎。国外一般将转基因食品或产品研磨成干粉后饲喂实验动物，来观察动物的不良反应以确定食品是否安全。有一个实验是这样做的，转基因西红柿研磨成干粉后饲喂老鼠，没有发现什么影响，于是就宣布转基因西红柿是安全的。在这里存在一个问题，如果在加

工成干粉的过程中转基因成分被破坏了，当然就不会对小鼠产生什么影响。并且实验未检测干粉中转基因成分的含量。众所周知，中国人很少把西红柿磨成干粉去食用，普遍喜欢食用新鲜的西红柿，新鲜西红柿里的转基因成分肯定是存在的。实际上，这种试验结果对保证中国人的食用安全性方面的意义不大。因为该实验并没有解决转基因西红柿是否安全这个问题。当然，公众一般可能不了解该实验存在的这个漏洞。科学家们说实验证明转基因西红柿的食用是安全的，公众就会对其安全性深信不疑。但长此以往，一旦出现问题，可能会使公众失去对科学家的信任。

另外，前面所描述的一些评价转基因食品安全性的一些方法，尚存在一定的局限性。例如，对于实质等同性原则来说，虽然一种新的食品与一种已知食品有 99% 的相同，即除含有一种新的毒素外，二者具有实质等同性，但是这种食品可能需要进一步细致的检验，以明确该毒素对人类健康的危险；而即使一种新食品与其对应的现存食品只有 70% 的相同，特别是当营养成分的不同可被一种混合膳食替代时，这种新食品也可能仅需要很小程度的检验测试，可能不会对人体有负面影响。因此，用实质等同性这个概念并不能完全预测新食品是否需要动物实验。并且有的科学家认为来自 GMOs 和来自相应非遗传修饰生物体的食品根本没有可比性，应该是两种不同的东西，也有科学家认为强调了实质等同性则会过分注重对营养和非营养成分的对比，而忽略对新蛋白或新毒素的注意。

第三章　会“飞”的基因——基因流与基因污染

《生物多样性公约》条款第 8 条中指出，转基因生物（生物技术改性活体）可能对环境产生不利影响，从而影响到生物多样性保护和持续利用。前面我们介绍了来自转基因生物的食品的安全性，主要讨论的是对人类健康的影响。下面介绍转基因生物对环境和生物多样性存在的风险问题。主要分三个方面进行介绍：转基因逃逸（基因流）、非靶标效应和害虫对抗虫作物的耐受性进化。

一、基因流

基因流这个词来自英文“gene flow”，在生态学上通常主要指由于杂交或迁移而导致基因（遗传物质）从一个繁殖群体向另外一个群体的扩散，使得繁殖群体中的等位基因频率发生变化，基因流是双向的。一般认为基因流是一个有力的进化力量，少量的基因流就能够抵消其他因素的影响诸如突变、漂变和选择。许多物种中存在着丰富的形态学和基因频率的地理变异，这种变异是两种力量平衡的结果：突变、遗传漂变以及自然选择导致种群间的遗传分化，而基因流则通过基因的扩散阻止种群间的分异。

在生物安全的文献中基因流主要是特指外源基因在 GMOs 和与其有亲缘关系的生物间的交流。基因流有两种实现方式，一是在自然状态下携带转基因的花粉通过风媒或虫媒传布，一旦在环境中找到受体并形成可育或不可育的杂交后代就完成了转基因向环境中的扩散的过程，当然转基因生物也可以作为花粉受体形成携带转基因的后代，进入野生环境；二是转基因生物尤其是转基

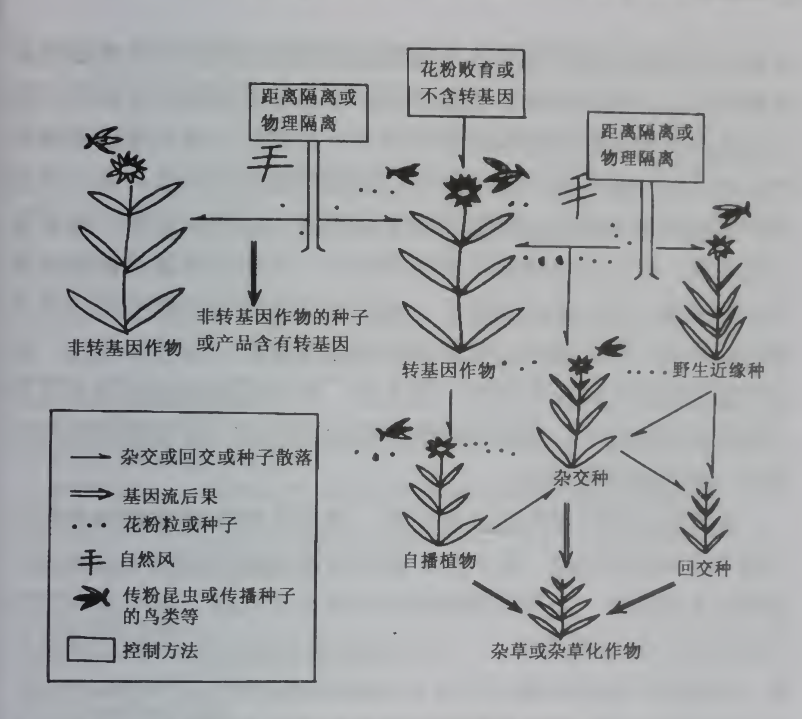


图 3-1 基因流发生及其控制的可能途径

因植物收获后，其种子有可能散落在环境中形成自播植物（volunteers），开花后与其野生近缘种杂交，携带有选择优势性状的自播植物也有可能成为杂草（图 3-1）。

这两种形式或过程也称为转基因逃逸（transgene escape）。然而，转基因逃逸的发生并不意味着转基因一定能够在自然界进行无限制的留存与转移，表 3-1 列出了决定转基因能否在自然界中存留，携带转基因的杂交种能否在自然界中定居的有关因素。将这些问题都搞清楚了，就能解决这样一个关键的问题，即转基因是否存在适合度代价。在这里，适合度指基因型的适合度，即指某个基因型的携带者对未来世代的基因库所做的相对贡献。在没有选择压力下，如果特定基因型个体的适合度低于种群平均的适

合度，即可以认为该基因型存在适合度代价。例如，在喷洒除草剂的情况下，携带抗除草剂基因的作物本身或其与野生杂草的携带转基因的杂交种就能够正常生长，开花结籽，而不具除草剂抗性的杂草就不能生存，这就说明在有除草剂存在的条件下，转基因作物相对于不抗除草剂的杂草来说具有一定选择优势，或说适合度较高。但在不喷洒除草剂的情况下，农田的杂草可能就会生长比较茂盛，产生更多的种子，而抗除草剂的作物和携带抗除草剂基因的杂交种可能由于转基因的存在而带来一种遗传负担，植物不能正常生长和正常结籽，就是说，抗除草剂的转基因在不存在除草剂的情况下，可能会降低植物的适合度，也就是说转基因具有一定的适合度代价。

如果转基因不存在适合度代价，该转基因将可能能够在野生种群中得到保存并进一步产生扩散以致产生较严重的生态学和生物进化上的后果，如果外源基因存在适合度代价，将会在自然界的生存竞争中逐渐丢失，不会在自然界中留存并导致严重的后果。目前科学家对转基因是否存在适合度代价这个问题有争论，这个问题依转基因的不同和受体植物以及环境因素的不同而有不同的结论，需要采取个案分析的原则，即一事一议的原则，目前尚不能得出一个一致的答案。

在这里还有一个概念需要说明一下，就是基因渐渗，它一般是指两个种杂交后形成可育的后代，并且可通过不断地与亲本的回交而实现一个种的基因插入到另外一个种的基因组中。在生物安全文献中用来特指转基因在亲本间的交流过程。渐渗杂交的经典例子是一些“路易斯安娜鸢尾植物”种类间的杂交。例如铜红鸢尾、短茎鸢尾和六棱鸢尾的分布区在美国的路易斯安娜州（Louisiana）南部是重叠的，有很多的研究报道了这三个物种间在自然条件下产生的多例渐渗杂交。研究发现，一些特异性的分子标记在铜红鸢尾与六棱鸢尾的杂交种中以较低的频率存在，研

究者认为花粉的交流导致了种间杂交，并认为研究结果支持这样的一个假设，即携带这些分子标记的另外一种鸢尾起源于上述两个种间的渐渗杂交。而在一个动物种群间的渐渗杂交事件中，研究者发现，在存在杂交种的地区，有冠肉的蝾螈种群替代了一种有花纹的蝾螈，其遗传特征是存在较低频率，但可检测出的来自后者的等位基因。

表 3-1 决定作物与其野生亲缘种的杂种在农田或自然生境中定居可能性的因素

Ⅰ. 产生可存活的杂种种子
1 两个亲本基因组的可亲和性（有丝分裂和遗传稳定性）
2 胚乳供养杂种胚发育的能力
3 杂交的方向：一个亲本比另一亲本作为母本可能更有利于胚和种子的发育
4 杂种种子的数量和活力
Ⅱ. 杂种种子萌发的植株的定居
5 种子的休眠
6 杂种植株的活力
7 杂交的方向：母本效应影响幼苗的活力
8 生境性质：野生、半野生或农田生境
9 来自其他植物的竞争
10 害虫、病害和动物捕食的影响
Ⅲ. 杂交种进行无性和有性繁殖的能力
11 无性繁殖的方法
12 无性繁殖体在农田生境中的存留
13 无性繁殖体的散布
14 无性繁殖体对自然生境的入侵
15 有性繁育系统：杂交亲和性、自交亲和性以及同任一亲本种回交的能力
16 雄性和雌性可育性：有丝分裂稳定性和染色体配对
17 种子数量和活力
18 种子的休眠
19 生境性质：野生、半野生或农田生境
20 来自其他植物的竞争
21 害虫、病害和动物捕食的影响

资料来源：Dale PJ. *Molecular Ecology*, 1994, 3: 31 ~36

栽培作物与其野生近缘种间的基因流主要有两个不利的后果：导致和提高杂草化，即杂草化进化和使得野生近缘种灭绝。例如，栽培稻与野生稻间的基因流动几乎导致了一种野生稻的灭绝，研究发现野外采集的特产于台湾的野生稻的性状逐渐接近栽培稻，并且其种子和花粉的育性大大地降低。并且已经有研究表明，栽培作物与野生种间的基因流能够提高野生种的杂草化程度。科学家列举了世界上的 13 重要作物与其野生近缘种的自然杂交，认为 7 种作物与其野生近缘种的杂交能够导致或提高后者的杂草化（表 3-2）。

表 3-2　世界上重要作物与其野生近缘种间的自然杂交及影响

面积排序	作物名	拉丁名	面积（百万公顷）[a]	杂交的证据[b]	杂交的影响	
					杂草进化	灭绝风险
1	小麦	*Triticum aestivum*[c]	228.13	+	否	无
		T. turgidum		+	是	无
2	水稻	*Oryza sativa*	149.56	+	是	有
		O. glaberrima		+	否	无
3	玉米	*Zea mays*	143.63	+	否	无
4	大豆	*Glycine max*	67.45	+	是	无
5	大麦	*Hordeum vulgare*	65.31	m	否	无
6	棉花	*Gossypium hirsutum*	51.29	+	否	有
		G. barbadense		+	否	无
7	高粱	*Sorghum bicolor*	45.25	+	是	无
8	粟米	*Eleusine coracana*[c]	38.08	m	否	无
		Pennisetum glaucum[c]		+	是	无
9	菜豆	*Phaseolus vulgaris*	28.67	+	是	无
10	油菜	*Brassica napus*	24.04	+	否	无
		B. rapa		+	否	无
11	花生	*Arachis hypogaea*	23.65	无	–	–
12	向日葵	*Helianthus annuus*	19.63	+	是	无
13	甘蔗	*Saccharum officinarum*[c]	19.62	+	否	无

注：a. 1997 年时的估计面积；
b. m，只有形态学证据；+，有更多的杂交证据；

c. 其他的种类只占该作物总面积的很小部分；

资料来源：Ellstrand NC *et al*. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1999, 30: 539～563

在欧洲环境署的一份有关转基因植物环境影响的报告中，将转基因油菜基因流的风险列为第一位（表3-3），并列举了几类容易与油菜发生基因交流的芸苔属植物或其近缘种，按照形成杂种的难易程度将芥菜排在第二位，仅次于芜菁（表3-4）。

表3-3　几种主要作物基因流风险的等级

作物	由杂交导致的基因流的频率	
	作物之间	从作物到野生近缘种
油菜	高	高
甜菜	中到高	中到高
玉米	中到高	中到高
马铃薯	低	低
小麦	低	低
大麦	低	低
水果类—		
草莓、苹果和李子	中到高	中到高
悬钩子、欧黑莓、红醋栗	中到高	中到高

资料来源：欧洲环境署环境报告 No. 28, 2002

表3-4　按与甘蓝型油菜形成杂交种能力划分的野生近缘种的级别（1～9级）

种类	分布	杂交情况		
		F_2代的产生	回交后代的产生	等级
野芜菁 *Brassica rapa*	原产于欧洲和北美。中国无分布。	是	是	1
野生芸苔 *B. campestris*	中国河南、陕西、山西、福建及相邻省份山区有分布。	是	是	1
野生芥菜 *B. juncea*	中国新疆、青海、甘肃、西藏、辽宁、河北以及江苏、安徽、湖北等省均有分布。	是	是	2

（续）

种类	分布	杂交情况		等级
		F_2 代的产生	回交后代的产生	
野甘蓝 *B. oleracea*	英国及地中海沿岸野生。中国无分布。	是	是	3
黑芥 *B. nigra*	中国新疆伊犁、尉犁以及甘肃武山、定西、榆中有分布。	?	是	5
灰白芥 *Hirschfeldia incana / B. adpressa*	原生于地中海到近东地区。中国无分布。	否	是	6
野萝卜 *Raphanus raphanistrum*	原产于欧洲、亚洲北部及北美地区。中国四川南江县有分布。	否	是	6
野白芥 *Sinapsis arvensis*	原产于欧洲。中国无分布。	否	否	8

资料来源：综合欧洲环境署环境报告 No. 28. 2002；Transgenic Research（Scheffler, JA& Dale, PJ, 1994, 3: 263～278）；《中国芥菜》（刘佩瑛，1994）；《中国植物志》第33卷（周太炎等，1987）；《中国农业百科全书》（农作物卷，1991）；云南植物研究（汪良中等，1982，4: 367～373）

中国是芸苔属植物的起源地之一，也是油菜等芸苔属作物的一个生产大国（图3-2）。在野外存在着芸苔属的野生近缘种，在农田里也栽种着许多种芸苔属植物，而芸苔属的植物间非常容易进行杂交，这样就为转基因的逃逸提供了条件。芸苔属植物的种子非常小，在收割或运输过程中很容易散落形成自播植物，在随后的轮作作物农田中成为杂草。芥菜型油菜——野生芥菜是我国农田中的一种重要的杂草，从长江流域到中国西北和北方各省都有分布，对农业生产的危害很大。野生芥菜的两个原始亲本种：黑芥和野生芸苔在中国也有分布，它们都与油菜有较高的杂交亲合度（表3-4）。

中国也是水稻的起源中心之一，中国水稻栽培的历史悠久，栽培面积占世界稻作面积的四分之一。在野外主要存在着三种野



图 3-2　美丽的田间油菜
（米湘成 摄影）

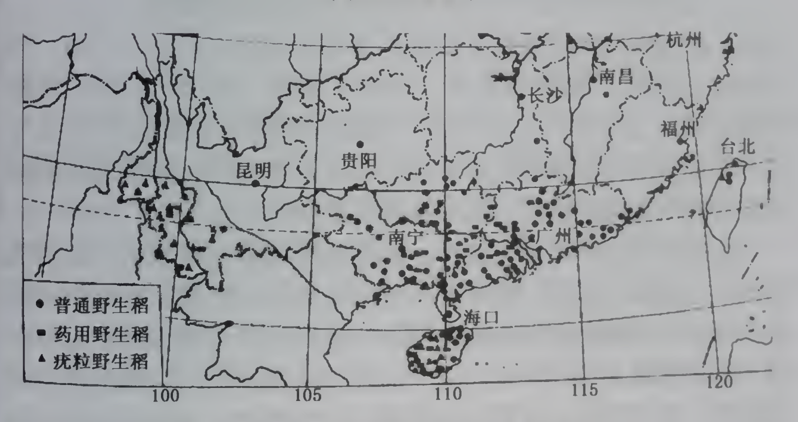


图 3-3　三种野生稻集中分布在中国南部
（引自《农业百科全书—农作物卷》（下卷））



图 3-4　栽培大豆与野生大豆相邻生长
（黄河三角洲地区是野生大豆的集中分布地，但是随着农耕地面积的增加，其分布面积在缩小。图中原来分布野大豆的地方种上了栽培大豆，形成了栽培大豆与野大豆相邻生长的状态。照片由中国农业科学院李向华提供。）

生稻：普通野生稻（分布于台湾、福建、湖南、广东、广西、海南和云南等省）、疣粒野生稻（分布于台湾、海南、云南）和药用野生稻（分布于广东、广西、云南、海南）（图 3-3 ）。在中国，栽培水稻与普通野生稻的杂交可以自然发生，但尚无实验证据表明其与其他两种野生稻具有杂交亲合性。

虽然大豆是严格自交植物，但是有报道说，在日本，在自然条件下，栽培大豆与一种野生大豆间产生了杂交种，而且国内野生大豆在自然界存在自然杂交现象，栽培大豆也能与野生大豆杂交，所以栽培大豆与野生大豆间的基因流是存在的，提示我们需要采取一种谨慎的态度对待转基因大豆的释放。像图 3-4 上出现栽培大豆与野生大豆相邻生长的状况是绝对不可取的。因为中国是大豆的起源中心，品质资源非常丰富，并且在国内分布范围很

广，从黑龙江北部（52°55′N）到广东、广西北部（近于24°N）。东起黑龙江抚远县（135°E），西北到甘肃省景泰县（104°E），西南到西藏自治区察隅县（97°E），东南到台湾北部也有分布。中国丰富的豆类遗传资源（图3-5）、野生大豆资源以及丰富的大豆遗传资源绝不能受到污染！

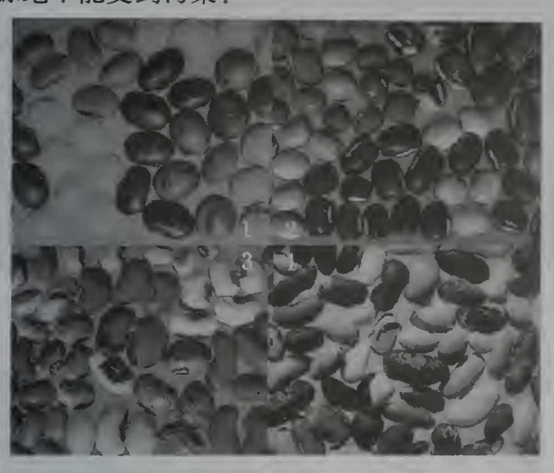


图3-5　中国丰富的豆类遗传资源的一部分
1. 大豆　2. 小豆　3. 豇豆　4. 菜豆(董玉琛摄影)

转基因树由于能够在自然界中生存更长的时间，因而有可能增加基因流的风险。有研究发现，在栽培杨树附近的野生杨树的种子有0.2%是由栽培杨树传粉而形成。中国国家林业局已经于2002年9月以新品种的形式批准了一种转基因抗虫杨树（图3-6）的商业化生产，美国农业部、环境保护管理局和食品药品监督管理局联合批准了一种抗病毒的番木瓜的商品化种植（在夏威夷，75%种植的番木瓜是转基因的），从1998年开始，美国大陆的超市中就能买到这种经遗传修饰抗病毒的番木瓜。而加拿大政府今年1月份宣布同意从美国夏威夷进口两种抗病毒的番木瓜，因为转基因番木瓜已经在加拿大批准作为水果销售（图3-7）。



图 3-6　已经商业化生产的转 Bt 基因抗虫黑杨
（照片由中国林业科学研究院胡建军博士提供）



图 3-7　转基因番木瓜及非转基因番木瓜
（照片的右边为转基因抗病毒的番木瓜，长的繁茂，左边为非转基因番木瓜。康奈尔大学 D. onsalves 摄）

迄今为止，除了番木瓜，美国政府还批准其他一些转基因树种的田间试验（表 3-5）。

表 3-5　美国批准进行田间试验的几种转基因树木

树的种类	开发单位	插入特性
杨树	Oregon 州立大学	除草剂耐受性，抗虫性或不育
桉树	南非 Monsanto 林业公司	除草剂耐受性
颤杨	Michigan 技术公司	木质素修饰
香枫	Westvaco 公司	除草剂耐受性
白云杉	加拿大林业公司	抗虫性
胡桃	加州大学戴维斯分校	改变根的构成
苹果	Agritope（现名为 Exelixis）公司	改变果实的成熟期

资料来源：J. Kaiser. 2001. Science, 292：34～36

在转基因动物方面，目前比较成熟的、与我们关系比较密切的并已接近商品化的主要是转基因鱼类。但是由于转基因鱼的安全性问题争论比较大，除了一些观赏鱼类（图 3-8）外，作为食品用的一些鱼类基本上都没有进入实际上的商品化养殖。世界野生动物保护组织（WWF）最近报告说，由于饲养的大马哈鱼每年都从渔场以数以十万计的数量逃逸到野外，造成野生的大马哈鱼在过去的 20 年间数量锐减 45%。饲养的品种能够在拥挤的环境中快速生长，比野生的更具有侵略性，并且由于其个头比较大，生长迅速，其生殖竞争能力大于野生的大马哈鱼，会与野生品种进行杂交，产生杂交种，可能会有遗传湮没（genetic swamping）的情况产生，造成野生遗传资源的丢失。最近有研究表明，饲养的大马哈幼鱼的生殖能力较野生的以及杂交种的高，而杂交种的又比野生的高，研究者认为这些幼鱼在将饲养或非原生的特性基因带入野生种群的遗传背景的过程中起着重要的作用（表 3-6）。目前的转基因鱼所转入的外源基因基本上都是提高生长速度的，如生长激素基因，所以转基因鱼与对应的非转基因鱼相比，生长更快，个头更大（图 3-9，图 3-10），生殖竞争能力更强，所带来的潜在的生态学风险问题更多。虽然已经有科学家育成了不





图 3-8　能够发出五彩斑斓荧光的转基因斑马鱼（Zebrafish）
转入的基因来自一种水母
（资料来源：www. glowingpets. com 以及 http：//www. people. com. cn。）

育的转基因鱼，但是仍然有人认为没有百分之百的不育，并担心转基因鱼本身或其与野生品系间的基因流会影响野生种群的生存。

表 3-6 饲养、杂交和野生大马哈幼鱼的生殖能力比较

	携带受精胚的幼鱼		受精成功率（每巢的受精卵的百分数）		受精效率（每次产卵的受精百分数）	
	池塘 1	池塘 2	池塘 1	池塘 2	池塘 1	池塘 2
野生	2	1	3.6 ± 12.0	5.7 ± 19.7	5.4 ± 14.7	17.1 ± 34.2
杂交种	6	2	4.5 ± 7.5	11.2 ± 26.5	7.8 ± 8.6	22.4 ± 35.3
畜养种	4	9	6.1 ± 12.1	16.9 ± 27.7	9.1 ± 14.1	25.4 ± 31.0

资料来源：Ecology Letter. 2003, 6: 541 ~ 549

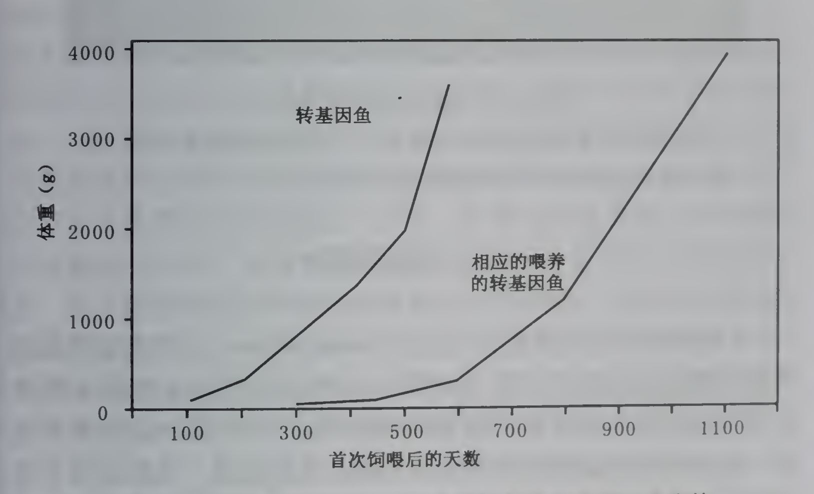


图 3-9 转基因大马哈鱼比相应的非转基因鱼的生长速度快
（资料来源：E. Stokstad. 2002. Science, 297: 1797）



图 3-10　相同年龄的大马哈鱼
（上面的为转生长素基因大马哈鱼，下面的为非转基因大马哈鱼。照片由绿色和平组织香港办事处提供）

二、基因污染

“基因污染”来自英文“gene contamination”，用来指转基因生物的外源基因通过某种途径转入并整合到其他生物的基因组中，使得其他生物尤其是植物的种子或产品中混杂有转基因成分，造成自然界基因库的混杂和污染。通俗地讲，从基因流与基因污染的关系来看，基因流是原因，基因污染是后果。理论上讲，只要从源头上阻断基因流就能防止基因污染的发生。

遗传湮没（genetic swamping）：通常指由基因流导致的个体数量较大种群的种与能够与其杂交亲合的个体数量较小的（隔离）种群的种间的杂交而引起小种群的遗传多样性丧失，从而使得后者有绝灭的风险。

虽然转基因生物包括植物与动物以及微生物都会有基因流与基因污染的发生，但是由于目前商品化生产的只是少数几种农作物，因此目前讨论和争论比较多的是转基因作物的风险。由于许多栽培作物都驯化自野生植物，在自然界中，这些农作物都存在自己的野生近缘种。全世界至少有 44 种栽培作物能够与它的一种或几种野生近缘种杂交，其中就包括现在已经商品化种植的转基因作物，如油菜、玉米和大豆等。目前颇受关注的基因流的风险主要有两个方面的内容：一是转基因作物与其野生近缘种尤其是杂草间的基因流，目前转入作物的插入特性以抗除草剂的为多；其次是抗虫和抗病毒，然后是抗逆。当这些转基因通过基因流逐渐在野生种群中稳定下来后就使得作物的野生近缘种具有了获得选择优势的潜在可能性。这样，作物本身及其野生亲缘种就有可能成为杂草。如果获得选择优势的野生亲缘种本身就是杂草，那么就会为该杂草的控制增加很大的困难。转基因在野生种群的固定将导致野生等位基因的丢失而造成遗传多样性的丧失，而且转基因进入野生种群的遗传背景，也会造成对野生遗传资源的污染和破坏。转基因向作物野生近缘种或杂草的转移，可能也会对其他物种产生影响，例如抗虫性的基因转入野生植物中，可能会对野生昆虫种群产生影响。

另一方面是转基因作物与转基因作物或非转基因作物间的基因流，最近的几个事件表明，作物间的基因流已经将转基因带入其他非转基因植物，并且这样的基因流可能会产生一些环境、经

表 3-7　三种 GM 作物的花粉散布

特性	油菜	小麦	玉米
是否异交	是	是（有限的）	是（有限的）
检测到的花粉漂移距离	2.5～30 000 米	48～400 米	50 米
自播植物的化学控制	可以（8～11 元/公顷）	可以（33 元/公顷）	可以（费用各异）
需要的隔离距离	100 米（类似品种）	3 米（相同的作物种类）	15～200 米（依田间面积而定）
	800 米（其他油菜作物）	10 米（其他作物）	

资料来源：*Nature Biotechnology*. 2002. 20：537～541

济、或社会影响，例如：①在加拿大的转基因油菜事件中，三个抗不同除草剂品种的油菜间的杂交产生了抗多种除草剂的自播植物，虽然其他除草剂如 2，4-D 等能够控制这些“新杂草”，但能够选择余地减少了，而且需要投入额外的成本（表 3-7）；②墨西哥偏远地区本地玉米品种中发现存在转基因使人们对商品化生产以后对转基因封闭管理的可能性产生了怀疑；③据报道，油菜抗除草剂基因向非转基因油菜的基因流已经导致了至少一件有关知识产权的诉讼案件，被告人感到很无奈，因为他是基因污染的受害者；④如果用于食物或饲料的种子被用于工业化生产生化药品，从而造成转基因植物污染，将会导致食品安全的问题，2002 年 10 月份美国发现种植的食用大豆中混入了生产药物的转基因玉米的茎叶，导致大量的大豆被销毁；⑤如果生产有机产品的作物生产了被转基因成分污染的种子或种子产品，其有机证书就会被吊销，因为在美国，转基因作物的产品是被排斥在有机产品之外的；⑥被转基因植物无意授粉产生的种子有可能成为转基因向其他品种或野生近缘种转移的“遗传桥梁”。外源基因进入并整合到其他生物的基因组中，使得其他生物尤其是植物种子混杂该

外源基因成分，会造成自然界物种基因库的混杂和污染。中国是许多农作物的起源中心，如大豆和油菜等，因此更应该注意避免基因流与基因污染的发生，保护宝贵的作物遗传资源。

1998 年，孟山都（Monsanto）公司的调查员在加拿大 Saskachewan 省农民 Percy Schmeiser 家的田里发现生长有孟山都公司开发的抗除草剂（草甘膦）的油菜。随后孟山都公司向法院起诉 Percy Schmeiser 侵犯了该公司的专利权。但 Percy Schmeiser 争辩并用试验证明说，他田里的这些转基因油菜是 1997 年被过路的货车吹起路边别人家种的转基因油菜田里遗留散落的种子而落到他自己田里而造成的混杂。并且他自己田里的油菜一般不喷草甘膦除草剂，没必要偷用孟山都公司的转基因抗草甘膦除草剂油菜的种子。但是法庭判定 Percy Schneriser 要赔偿孟山都公司 15 450元加币。理由是 Percy Schmeiser 是否主观愿意种植孟山都公司的抗除草剂油菜与否无关紧要，他已经侵犯了孟山都公司的专利。因为 Percy Schmeiser 意识到他的田里有抗除草剂的转基因油菜，而不采取措施全部毁掉，也属于侵权行为。最近，Percy Schmeiser 说他也要起诉孟山都公司，由于该公司转基因油菜的污染，已经迫使他毁掉了自己精心培育 50 年的一个品种。

目前科学家研究出了一些生物技术手段应用于控制基因流，比如将外源基因转入作物的细胞质基因组中可能使花粉中不含有该外源基因，将外源基因转入作物的雄性不育系中可保证含有该外源基因的花粉是不育的，也可以将外源基因导入植物的某个特定的染色体组上以降低转基因植物与不含该染色体组的近缘种间产生转基因交流的可能性，或者使用一种技术让外源基因仅在叶

片等营养器官中表达而不在花等繁殖器官中表达或者在开花时阻止转基因的表达，以及使获得外源转基因的杂草的适合度降低并最终导致该杂草的死亡等等。这些理论与技术的可行性尚存在争论，并且这些技术仅仅有少数在个别植物上得到验证，其中的大部分尚未有具体的研究实例，理论离现实的距离还是比较远的。

另外的控制基因流的方法是从阻断交流过程而考虑的。现在主要用隔离的方法（图3-1），其中主要是利用距离进行隔离。因为半个世纪以前，植物育种学家已经进行了如何保护作物不受外来花粉污染的研究，主要的农作物大都进行了传粉隔离距离的研究，我们在进行安全隔离转基因作物时，借鉴了这些为保证种子的基因纯度而进行的有关隔离距离的研究。隔离距离一般要依据传粉距离来确定。然而传粉距离受很多因素的影响，例如风力和风向以及昆虫区系等。另外，释放面积也会影响到传粉距离。如在一次转基因油菜的研究中，释放转基因油菜的面积只有 75 平方米，47 米处转基因传粉频率就降到 0. 000 33% ，在另外一次释放中，转基因油菜的面积 400 平方米，200 米处的传粉频率为 0. 015 6% ，400 米处为 0. 003 8% 。远远大于上次的数据。而在一次较大规模的释放中（转基因油菜面积达 10 公顷），360 米处花粉的密度只降到释放地边缘花粉密度的 10% ，在 1. 5 千米处，仍计数到 22 粒/立方米的花粉。在最近的一次更大规模（25 ~ 100 公顷）的油菜花粉的传布距离研究中，研究者用抗除草剂的传统油菜品种来替代转基因品种，发现花粉能够传布 3 000 米（图 3-11），并且没有发现早期研究中得出的规律：随着距离的增大，花粉的密度降低。作者认为其原因可能与释放面积非常大以及油菜的风媒和虫媒多种传粉途径有关。

鉴于各种研究得出的各类作物的隔离距离有很大的出入，农业部颁布的 2002 年 3 月 20 日开始实施的《农业转基因生物安全评价管理办法》中就给出了在中国耕作环境下主要农作物田间的

参考隔离距离（表3-8），为我们释放相关的转基因作物提供了很好的建议和参考意见，当然其实用性尚需实践中的检验。

表3-8　主要农作物田间隔离距离（参考）

作物名称	隔离距离（m）	备　注
玉米 *Zea mays* L.	300	或花期隔离25天以上
小麦 *Triticum aestivum*	100	或花期隔离20天以上
大麦 *Hordeum vulgare*	100	或花期隔离20天以上
芸苔属 *Brassica* L.	1000	—
棉花 *Gossypium* L.	150	或花期隔离20天以上
水稻 *Oryza sativa* L.	100	—
大豆 *Glycine max*（L.）Merrill	100	—
番茄 *Lycopersicum esculentum* Mill	100	—
烟草 *Nicotiana tabacum*	400	—
高粱 *Sorghum vulgare* Pers.	500	—
马铃薯 *Solanum tuberosum* L.	100	—
西葫芦 *Cucurbita pepo*	700	—
苜蓿 *Trifolium repens*	300	—
黑麦草 *Lolium perenne*	300	—
辣椒 *Capsicum annuum*	100	—

资料来源：农业转基因生物安全评价管理办法. 2002

三、两个有关的事件

1. 墨西哥玉米受污染事件

2001年9月，墨西哥政府报告说瓦哈卡州（Oaxaca）的玉米受到一种没有被批准在墨西哥种植的转基因Bt玉米的污染，该研究测定了来自瓦哈卡州22个村庄的玉米样品（图3-12），发现其

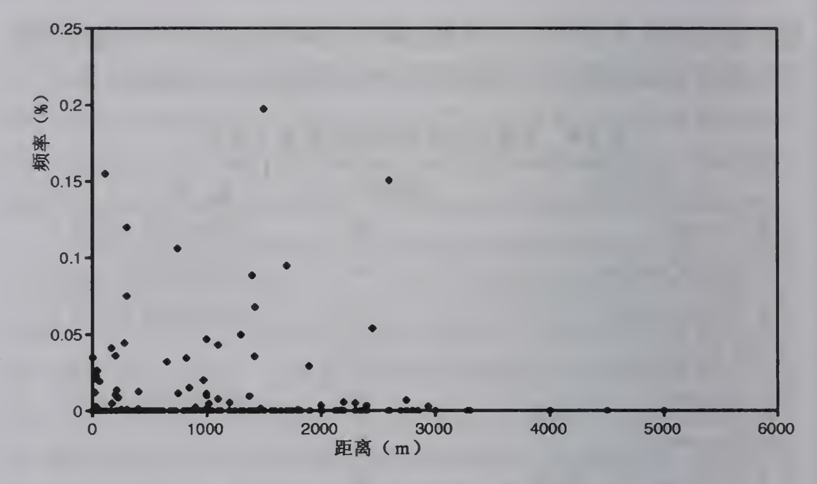


图 3-11　距离与传粉频率关系

（在《科学》杂志中刊登的一个研究报告中，研究者用传统育种的抗除草剂油菜来研究花粉的传播距离。横坐标是传播距离，纵坐标是在不同距离上抗除草剂基因存在的频率。）

中 15 个的污染率在 3% ~10% 。由于墨西哥是玉米的起源中心，玉米种质资源特别丰富（图 3-13），而且在野外分布多种与玉米能够自然杂交的亲缘野生种——玉米草，因此该事件引起世人的极大关注。2001 年 11 月，美国科学家 Chapela 与其学生 Quist 在《自然》杂志（Nature）上报道了墨西哥玉米受到基因污染的分子证据（图 3-14）。2002 年 1 月 23 日，墨西哥环境部门公开了一个研究

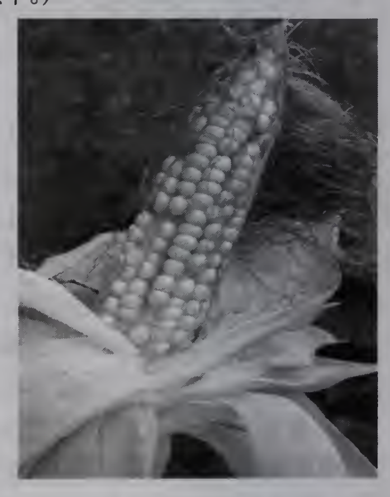


图 3-12　怀疑受污染的本地玉米品种

（照片由绿色和平组织提供）



图 3-13 墨西哥丰富玉米品质资源
（照片由绿色和平组织提供）

报告，确认了墨西哥玉米受到转基因污染的事实。2002 年 4 月 11 日，《自然》杂志发表声明，说要收回这篇证据不足的文章（指 Chapela 与其学生 Quist 的文章），并发表了若干科学家（包括 Matthew Metz，Johannes Futterer，以及 Nick Kaplinsky 等）对该文的研究方法提出质疑，同时也发表了 Quist 和 Chapela 撰文对质疑的回答，并给出了 DNA 杂交的证据，再次肯定了转基因在墨西哥玉米中的存在（图 3-15）。由于 Quist 和 Chapela 指出，他们发现的其中两个序列与目前市场上的诺华（Novartis）的转基因玉米有关，所以这几位作者都对这一点进行了质疑，但未涉及 CaMV 启动子的 PCR 阳性结果。

2002 年 4 月 23 日墨西哥政府再次确认了本土玉米品种受转基因污染的事实，国家生态研究所所长 Exequiel Ezcurra 指出，平均有 8% 的植物受到污染，而在有些地方，污染甚至超过 10%。事情到此还没有结束，2002 年 6 月 27 日，《自然》杂志又发表了一些科学家的通讯，由于《自然》在发表了 Chapela 等的文章以

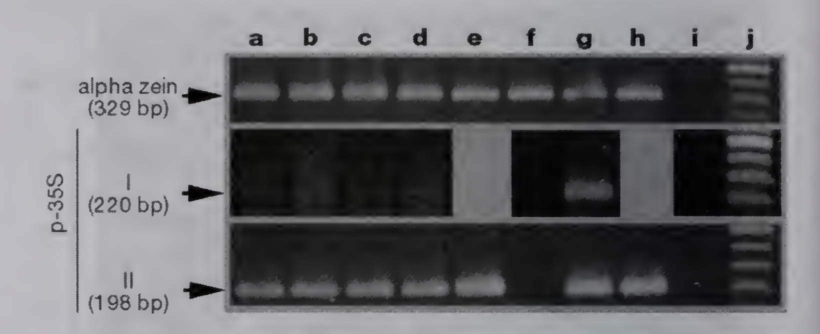


图 3-14 墨西哥玉米受到基因污染的分子证据

（最上面的电泳胶是玉米特异性的 α-玉米蛋白基因，中间和下面的电泳胶是35sCaMV 转基因表达启动子的 PCR 检测结果。a－d 为当地玉米品种，e 为取自粮仓的样品，f 为来自秘鲁的负对照，g 为 Monsanto 公司的 Roundup－Ready 转基因抗除草剂玉米，h 为 Monsato 公司的 Yieldgard 转 Bt 基因抗虫玉米，i 为 PCR 反应负对照，j 为 DNA 标记。左边是阳性片段的长度。资料来源：Nature. 2001，414：541）

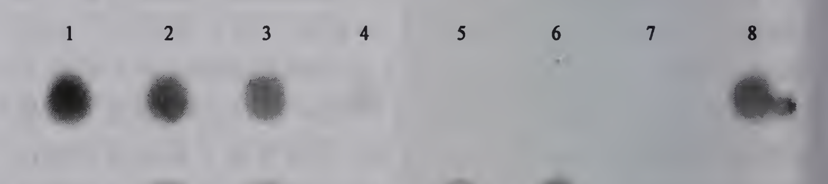


图 3-15 墨西哥被怀疑受污染的当地玉米品种与 CaMV 启动子探针的 DNA 点杂交

（上面一行：1. 100% 转基因玉米材料；2. 10% 转基因玉米材料；3. 5% 转基因玉米材料；，4. 1% 转基因玉米材料；，5. 0.5% 转基因玉米材料；6. 非转基因玉米负对照；7. 纯水负对照；8. 粮仓样品。下面一行：1～6. 当地玉米样品；7. 来自秘鲁的非转基因负对照玉米；8. 纯水负对照。资料来源：Nature，2002，416：602）

后，接着又发表声明说该文的证据不足，Andrew V. Suarez 直言不讳地对《自然》杂志编辑部的这种做法做出批评，认为科学就是源于假设和假设的检验，基本上所有的假设都会随着科学的进步或者得到进一步的修正或者遭到摈弃，科学杂志的任务就是为其提供一个公平的论坛，科学杂志本身不应该对于研究结论作出明确的取舍，尤其是在与经济和政治有关的问题上，更不应该在发表一篇文章后又发表撤回该文章的声明，在 Suarez 这篇文章的最后，十几位美国科学家也签名表示他们的不满。而 Kenneth Worthy 等的评论更让人感到震惊，他们认为《自然》的观点受到一些生物技术公司的左右，而且由于意识到 Quist 和 Chapela 的文章可能会对立法产生潜在影响，所以《自然》杂志就抢在生物多样性公约会议讨论生物安全议定书之前发表 8 位作者对 Quist 和 Chapela 工作的质疑，而这 8 位作者中的 7 位曾受诺华（Novartis）公司资助，该公司现在的名称为先正达（Syngenta）公司，另外一位作者 Johannes Futterer 也与诺华间接有关。Matthew Metz 和 Johannes Futterer 承认他们曾受到诺华的资助，但反驳说他们只是对实验数据提出疑问，不存在商业资助的因素，而且 Chapela 攻击诺华公司是报他本人与诺华公司间的私人恩怨（他本人曾是诺华公司的雇员）。Nick Kaplinsky 则认为 Chapela 本人是反对 GMOs 的一个组织（PANNA）的成员，这才是他持不同意见的原因。虽然争论比较激烈，但是有一点是确定无疑的：墨西哥偏远地区的本土玉米品种已经受到转基因的污染。

最近，来自第三世界网络（TWN）生物安全信息中心的消息进一步证实了墨西哥本土玉米品种的污染。2003 年 10 月 9 日，在墨西哥城举行了一个记者招待会上发布了有关部门于 2003 年 1 月和 7/8 月份进行玉米普查的结果，研究发现在墨西哥 9 个州的玉米田里的玉米含有转基因成分，其中包括在美国已经被禁止用于人类食品的星联（Starlink）玉米，甚至有的植株含有 2 ~ 4 种

转基因成分（这些转基因是一些大公司的注册产品）。被发现的转基因成分有以下几种：Bt-Cry9c（存在于安万特公司的 Starlink 玉米中），Bt-Cry1Ab/1Ac 基因（存在于孟山都 公司的 YieldGard，诺华公司的 Knockout，以及 Mycogen 公司的 NatureGard 转基因玉米中），Bt-Cry1C 基因（存在于 Mycogen y Ecogen 的转基因玉米产品中），以及 CP4EPSPS 基因（存在于孟山都公司 Round-up Ready 抗除草剂玉米中）。前三种 Bt 基因分别来自苏云金杆菌的不同变种，其表达的晶体蛋白均对昆虫有致死作用。

2. 加拿大抗除草剂油菜事件

最近，《英国自然》（*English Nature*）杂志报道了加拿大出现抗三种除草剂油菜自播植物的整个过程，认为是作物间基因流的结果，并再次提出了“超级杂草”的说法。

> 自播植物（volunteer plant）：与人工有意种植相对而讲，指自然萌发和繁殖的植株。一般指种子在收获或运输等过程中无意散落后萌发出的植株。
>
> 超级杂草（superweed）：指由作物与其野生近缘种杂交而产生的有害植物，往往要增加治理的投入成本。

在 1998 年，加拿大艾伯塔（Alberta）省转基因油菜田间发现了能够抗三种除草剂——草甘膦（Glyphosate）、固杀草（Glufosinate）和保幼酮（Imidazolinones）的油菜自播植物，其中抗草甘膦和抗固杀草的特性来自转基因油菜，而保幼酮抗性来自传统育种培育的抗性油菜（图 3-16 ）。1999 年，加拿大萨斯喀彻温省（Saskatchewan）的 11 块地的田间也确认了抗多种除草剂油菜自播植物的存在。并且在相邻油菜地的小麦田间也发现了能抗除草剂的转基因油菜自播植物。以上情况出现的原因就是基因流，可能是花粉借风力传布的结果，也可能是蜜蜂传粉或其他动物搬运



图 3-16 加拿大田间能抗三种除草剂的油菜自播植物
（照片由 Linda Hall 博士提供）

种子或花粉的结果。油菜田间基因流的后果是加拿大农民很难保证所种的非转基因油菜的种子是不含转基因的（“GM-free”），“GM-free”是美国、加拿大等发达国家为来自非转基因生物的产品贴的标签。

第四章　黑脉金斑蝶的恐惧
——兼谈非靶标效应

前面介绍了转基因生物与非转基因生物间的基因流可能导致的风险，下面从一个很有争议的事件，即有科学家发现转基因玉米的花粉可能会对一种蝴蝶产生致死效应入手，介绍转基因生物的非靶标效应。

一、黑脉金斑蝶的故事及其他

营养关系即食物链，是自然界中生物体间的最重要的联系，在自然生态系统中，食物链彼此交错连结，形成食物网。对于农业生态系统来讲，其食物链可能比较简单，营养级水平也少，其中一个最重要的食物链可以表示为“作物—害虫—害虫天敌”（图 4-1）。例如，棉铃虫取食棉叶，而草蛉捕食棉铃虫，又构成另外一个简单的食物链（图 4-2）。又如，蚜虫取食植物的叶片，而瓢虫又捕食蚜虫，这样就构成一个简单的食物链（图 4-3）。转基因抗虫作物释放到农田以后，除了会对其靶标害虫产生毒杀作用外，也会通过食物链影响到其靶标害虫的天敌。当然，非靶标昆虫（例如蜜蜂等传粉昆虫等）以及一些小型的动物如蝴蝶和鸟类等有时也可能会接触到抗虫蛋白从而受到影响。例如，美国科学家发现一种抗鳞翅目害虫的转 Bt 基因玉米的花粉能够影响到黑脉金斑蝶（也有译为大斑蝶或帝王蝶）的幼虫的生长和存活（图 4-4 ~ 图 4-6），并认为花粉会散落在玉米地周围的一种野生植物马利筋植物的叶片上，黑脉金斑蝶的幼虫是以马利筋植物的叶片

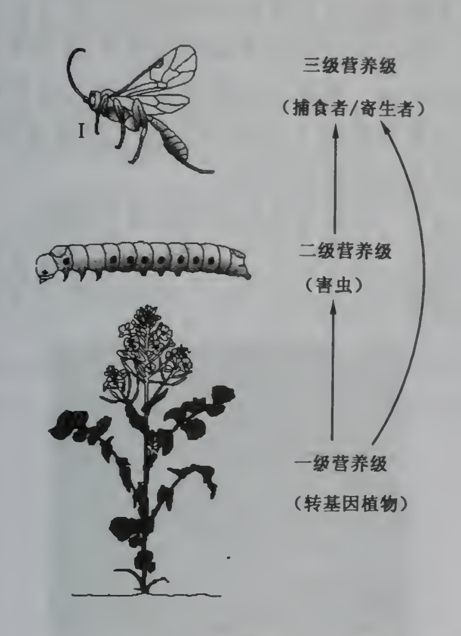


图 4-1　农田里比较简单的一种食物链
（资料来源：*Trends in Biotechnology*. 1999，17：210 ~ 216）



图 4-2　草蛉在摄食棉铃虫

为食的，在玉米散粉时正是黑脉金斑蝶的幼虫大量摄食马利筋植物叶片的季节，所以可能就会接触到这些含 Bt 毒蛋白的花粉从而受到影响。而在美国，黑脉金斑蝶很受欢迎，经常作为礼物赠送亲友，在婚礼等重大活动人们都喜欢放飞黑脉金斑蝶以示庆祝。因此该项研究结果引起极大关注。

有科学家认为，黑脉金斑蝶本身就属于鳞翅目，对 Bt 蛋白比较敏感是正常现象。也有研究认为能够表达高浓度毒蛋白，在田间可对黑脉金斑蝶产生致死作用的一种转基因玉米品种不久将会



图 4-3　瓢虫在摄食蚜虫





图 4-4　美丽的黑脉金斑蝶（*Monarch Butterfly*，也译为帝王蝶或大斑蝶）（左图：黑脉金斑蝶顶面观，照片由绿色和平组织提供；右图：黑脉金斑蝶侧面观，照片由 P. B. Southerland 拍摄）

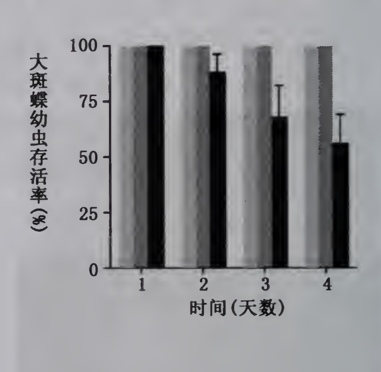
逐渐退出市场。但是转基因作物的非靶标效应不容忽视，并已经受到各界的高度重视和警惕。针对该事件的有关争论，详细的介绍见4.5部分。

对于转基因作物的非靶标转基因作物的效应，不同的研究有不同的结论。苏格兰作物研究所的实验发现，一种转雪花莲外源凝集素（GNA）基因的马铃薯能够有效地抑制其目标害虫——蚜虫的取食、生长和繁殖，实验中将瓢虫选来作为蚜虫的模式捕食天敌，当用饲喂转基因抗虫马铃薯的蚜虫喂养瓢虫时，瓢虫出现生殖问题，并且死亡比对照要早。瑞士联邦农业生态与农业研究站的一个研究小组分别用转基因 Bt 抗虫玉米和非转基因玉米喂养两种食草害虫——欧洲玉米螟和棉蚜夜蛾，然后再用这两种害虫



图 4-5　黑脉金斑蝶幼虫在啃食
涂有玉米花粉的叶片
（照片由康奈尔大学的 Kent Loeffler 拍摄）

饲喂普通草蛉，发现与对照相比，普通草蛉发育迟缓，死亡率较高。同一单位的另一课题组的最新研究认为，害虫如果食用 Bt 玉米，将会影响草蛉的食物的质量，从而在一定程度上影响草蛉的生长和发育。在田间情况下，草蛉总是喜欢捕食蚜虫的，而蚜虫基本上不受 Bt 蛋白的影响，所以 Bt 作物在田间不会构成对草蛉的威胁。



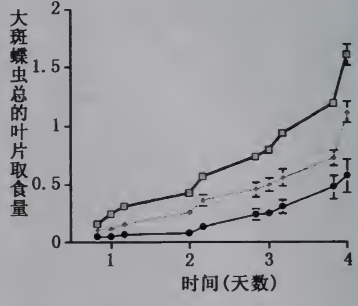


图 4-6　黑脉金斑蝶幼虫在不同处理的马利筋植物叶片上存活率（上图）和取食量（下图）
（浅色代表没有花粉的叶片，较深色代表涂有非转基因花粉的叶片，黑色代表涂有 Bt 玉米花粉的叶片。资料来源：Nature. 1999，399：214）

已经有研究表明，曾经广泛使用的杀虫剂 DDT 是有害物质，不易分解，且随着田间的喷洒，很容易进入水系，流入海洋，在浮游植物、浮游动物、较高营养级的捕食动物（如鱼类）以及更高营养级（如捕食鱼类的猛禽和兽类等）体内富集，并且人类的体内尤其是母乳中也有较高浓度的 DDT（图 4-7）。在南极的企鹅体内甚至爱基斯摩人的体内也发现了 DDT 的存在，说明有毒物质会在自然界中进行长距离转移的。一个普遍关心的问题是转基因植物体内的转基因成分是否会通过食物链如同 DDT 一样在较高营养级生物体内富集并产生负面影响？并且转基因表达产物是否也会产生长距离的转移？这些都是当前公众比较关心和担心的，迫切希望科学研究能够解答的问题。

目前，有几种抗虫基因在 GM 作物中广泛使用，例如，前面提到的 Bt 基因，以及 CPTI（豇豆胰蛋白酶抑制剂）基因和 GNA（雪花莲凝集素）基因等。其中，Bt 基因来自苏云金杆菌，CPTI

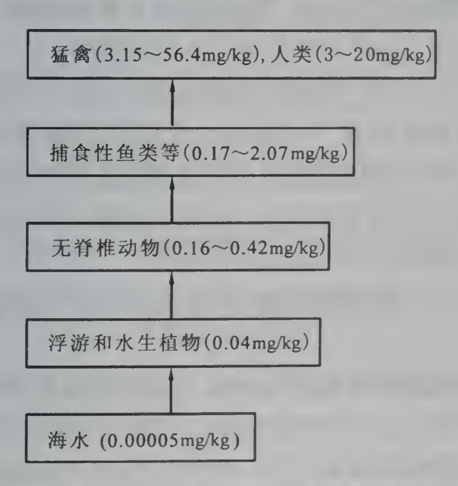


图 4-7　DDT 在食物链中的富集与转移
（资料来源：动物生态学原理（第 2 版），1992）

和 GNA 等基因来自植物本身。虽然它们在自然界中是自然存在的，并且这些基因编码蛋白的富集从未见有报道，但是，这些植物来源的抗虫蛋白从未在植物中以如此高的浓度（99% 的致死浓度）存在，并且可以直接在食用作物中表达；Bt 蛋白也从来没有能够如此容易地进入人类的食物链。所以其在自然界中富集的可能性可能需要重新评价。

除转基因作物本身产生的直接的非靶标效应外，也存在间接的非靶标效应。转基因作物进入农业生态系统后，随着生物体特性的改变尤其是获得了一些转入特性后，田间管理的措施也会有些改变，也可能会导致“小环境”的变化，如除草剂和杀虫剂的使用措施的改变，小环境的变化也会影响生态系统内的生物多样性及生物的种群动态。例如一项研究认为，种植抗除草剂的甜菜后不需要在播种或生长早期喷洒除草剂，就能够在一定程度和一段时期内允许田间杂草的存在，提高杂草和昆虫的生物量，为鸟类等野生生物提供食物来源。然而，也有研究表明，大量重复使用同一种除草剂，会对土壤生物产生负面影响。

转基因作物在每个生长季节结束后，大部分的植株成分，如种子和果实等都被收获，可能会大大降低其继续危害环境的机会。但是如一种转基因生物进入非农业生态系统即自然生态系统后，其生长和繁殖不是非常容易控制,其潜在的威胁可能会更大。

二、转基因作物对昆虫行为的影响

改变了基因型的转基因生物进入自然生态系统中，必然会在不同程度上影响生态系统中的物种。当转基因抗虫作物进入环境后，也必然会影响昆虫的行为，目标害虫或产生耐受性，或采取行动避开摄食能够杀虫的转基因作物，也必然会引起昆虫天敌行为的改变，或者选择避开摄食毒蛋白的害虫或者选择那些吃了毒

蛋白仍然能够正常存活的具有耐受性的害虫。

小菜蛾是油菜的一种主要害虫，它已经在田间进化出了对 Bt 杀虫剂的抗性，因此生物防治即用小菜蛾的天敌进行害虫治理就显得特别重要。具有抗性的小菜蛾摄食转基因 Bt 油菜的叶片组织以后，它的身体里就会有 Bt 蛋白的存留，但其生长发育不会受到影响而会完成整个生命周期，其天敌接触到它们体内的 Bt 毒素从而受到影响的可能性大大地增加。然而，英国的科学家研究发现，抗性小菜蛾体内 Bt 蛋白的存在并不影响一种寄生蜂的存活，并且当以转基因 Bt 油菜的植株在培养笼里培养小菜蛾的幼虫时，由于小菜蛾的 Bt 敏感品系比耐性品系生存的时间要短，所以寄生蜂倾向于寄生并杀死小菜蛾的 Bt 抗性品系，而寄生蜂本身并不受影响，这样还有助于阻止 Bt 抗性基因的扩散（图 4-8）。

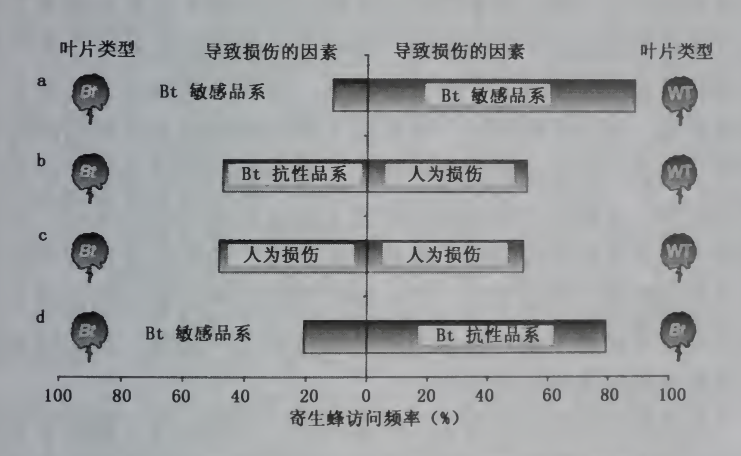


图 4-8　在选择性实验中，寄生蜂访问 Bt 叶片和非转基因叶片（WT）的频率

（人为损伤指在每片叶钻 5 个 2mm 的孔，Bt 敏感品系和抗性品系表示分别不同的品系摄食叶片以吸引寄生蜂。资料来源：Nature，1999，400：825）

三、对土壤生物的影响

转基因作物对土壤生物的影响，不仅包括初级基因产品，也包括来自生物和非生物反应所产生的次级产品的影响。土壤中的生物体通过捕食、竞争、对抗或共生而发生相互作用，一旦环境由于转基因产品的释放而发生改变，一些敏感生物体快速发生反应，达到一定程度以后，其他生物也发生反应，从而影响到整个土壤生态系统。转基因产品进入土壤有许多途径，其中最主要的途径是作物收获后，其残留物回到土壤中。其次，还可以随着根的分泌物进入根际的土壤生物圈。土壤生物群受转基因产品引入影响的程度依赖于很多因素，其中最重要的是土壤生态系统的复杂性和稳定性，那些简单并缺少生物多样性的生态系统容易受到进入土壤的转基因产品的影响。种植单一作物的农业生态系统相对比较简单，因而对于干扰比较敏感。相反，森林生态系统多样性程度高，相对比较稳定，因而其土壤生物群就不太容易因转基因产品的进入而发生迅猛的变化。土壤生物群因转基因产品引入而发生的一个微妙而重要的变化是土壤生物多样性的变动。生态系统中的多样性可以用种、属成分来测度，也可以应用分子生物学手段和数量分类的方法。对生物多样性的评价要包括许多对生态系统变化敏感以及对转基因产品敏感的每一种类，然后用多样性指数来确定多样性的变化。

转基因植物及其产物进入土壤以后，可能会与土壤微生物发生相互作用，影响到一些微生物的活动过程，而后者对生物地球化学循环有着重要的贡献，从而转基因植物对生物地球化学循环产生了重要影响。转基因植物与土壤微生物间可能的相互作用的例子如下：

- 转基因植物中的 DNA 转移到土壤中自然生长的微生物

体中；

● 重组事件使得一些细菌的固氮能力失活；

● 长期持续种植转基因作物所导致的重组事件，将会改变微生物的代谢途径；

● 重组 DNA 和基因产物（蛋白质）会流入作为饮用水源的地下水中；

● 转基因植物材料进入土壤将会刺激植物病原微生物具有比非病原体更强的竞争力。

转基因植物对生物地球化学循环的影响依赖于土壤类型和质地、气候条件以及转基因植物的种类等因素。需要检验对土壤生物地球化学循环可能影响的转基因植物有：①增进对植物营养的吸收的；②改变了直接或间接产物，或者是对营养元素的利用（如固氮、光合）的；③对特异植物病原微生物有毒性的或抗土壤微生物降解的；④利用痕量元素作为辅助因子的酶类被修饰了的。有人给出了简单的研究实验方法：选择一些简单的容易测度的微生物过程（活动），研究转基因植物材料及基因产物对这些过程（活动）的影响，并且一个过程（活动）受到影响有可能会间接地影响另外的过程（活动）。这些过程（活动）可以包括：酶的活性（如脱氢酶、磷酸酶、几丁质酶、过氧化氢酶和纤维素酶等），二氧化碳放出，氧消耗，氢消耗，硝化作用，反硝化作用，需氧的、厌氧的及非共生的固氮作用（共生的固氮作用比较难于估测），甲烷发生，各种基质的矿化作用（C、N、S、P），硫氧化作用。也可以研究转基因植物一次或多次释放对土壤生物过程（如硝化作用）的影响，以对照转基因存在和不存在时，土壤生物地球化学过程的变化。

转 Bt 基因作物的 Bt 毒蛋白可通过根系分泌物、残茬分解或秸秆还田等途径进入土壤生态系统。根据华南农业大学王建武博士的一个报告，Bt 蛋白可快速地吸附在土壤活性颗粒表面，与之

表 4-1　Bt 蛋白在土壤中的半衰期（天数）

蛋白类型	纯化的 Bt 蛋白	Bt 作物秸秆分解			
		实验室内分解		田间分解	
		棉花	玉米	棉花	玉米
CryIA（b）	17		25.6	4	1.6
CryIA（c）	9.3～20.2			7	
CryIF	3.13				
CryIIA		15.5		31.7	

资料来源：王建武，Bt 玉米毒素的环境去向及对土壤细菌群落多样性的影响. 国外生物安全信息，2002，(5)

紧密结合而避免了生物降解，并至少保持 8 个月的杀虫活性。Bt 作物的长期种植，可能使 Bt 蛋白在土壤生态系统中富集，影响土壤的特异生物种群、功能类型以及土壤生物多样性和土壤生态学过程。富集在土壤中的 Bt 蛋白可能通过淋溶作用污染地下水或通过降雨、灌溉污染地下水。

在实验条件下，无论转基因烟草叶子 DNA 还是质粒 DNA 进入土壤后的降解开始都比较快，但仍有少量 DNA 能够抵抗降解并且几个月内都能检出它们的存在，其原因可能是这些 DNA 被土壤颗粒吸收了，这样能够保护它们被完全降解。进一步的研究又发现，田间转基因烟草的残体中的标记基因可以存留相当长的时间。然而，转基因长期在土壤中存在的原因可能是植株残体对细胞内 DNA 保护的结果。针对这点，研究者将从转基因甜菜叶子中提取的 DNA 加入到土壤中去，6 个月后仍能在土壤 DNA 的提取物中检测到转基因的存在。重组 DNA 在土壤中能够存留较长的一般时间，增加了转基因产物进入土壤后向土壤生物体进行基因转移的生态风险性。

上述研究都是针对卡那霉素抗性标记基因的，另外还有些研究涉及氨苄青霉素抗性标记基因的。虽然，许多的抗生素抗性标

记基因都是来自土壤微生物，这些抗性基因向土壤微生物体内的转移可能并不会有什么不良后果，然而一旦受体菌是病原菌的话，就可能会增加控制获得了抗性基因的病原菌的难度。研究人员对于潮霉素抗性标记基因在土壤环境中的存留以及向土壤微生物体内的水平转移进行了研究，发现一种转基因曼陀罗植物中的潮霉素抗性标记基因以土壤为媒介向一种土壤病原微生物——曲霉菌发生了转移。

> 水平基因转移：与垂直基因转移相对应。指基因在不同种类生物之间由某些载体（如细菌等）介导的无性转移。水平基因转移能够使遗传上相距很远的物种间发生基因交换，如人和细菌。

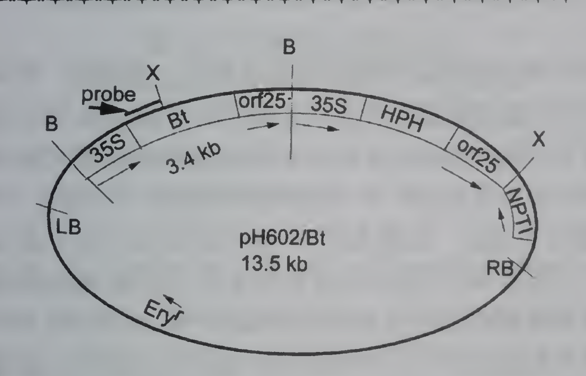


图 4-9　用农杆菌转化法获得转化 Bt 基因植株时所使用的质粒 pH602/Bt 图谱

（HPH 和 NPT1 分别为新霉素和潮霉素抗性标记基因。资料来源：Plant Physiology. 1996：112：115～120）

目前转基因过程一般要用抗生素抗性标记基因（图 4-9），而抗生素标记基因有向微生物产生水平基因转移的可能。所以人们就担心一些转基因生物的标记基因会通过各种途径进入有害微生

物，如细菌和病毒等的基因组内，使后者获得抗生素抗性。更担心的是有可能通过食品进入人类肠道的细菌内，在使人类致病时，获得抗性基因的病菌对抗生素有抗性而增加了治疗的难度。最近有科学家在志愿者身上做了这样的实验，12 名健康的和 7 名切除结肠的志愿者分别吃了含有 GM 大豆的一个汉堡包和一杯奶昔，结果在 12 名健康者的粪便中没有检测到转基因成分，而在 7 名做过肠道切除手术志愿者的粪便里检测到了转基因，说明细菌已经吸收了转基因食品中的 DNA 片段，虽然能够吸收转基因的细菌难以培养，种类无法确定，但是 3.7% 的遗传修饰 DNA 在细菌的体内存活下来仍然让人吃惊。

四、国内转基因抗虫棉的非靶标效应

目前转 Bt 基因棉花的释放面积比较大，在田间，转基因抗虫棉的害虫存在很多的寄生性天敌和捕食性天敌，Bt 棉可能会通过影响其害虫而影响到昆虫天敌。中国农业科学院棉花研究所的研究人员利用本所培育的转 Bt 基因抗虫棉品种（中棉所 29 和中棉所 30）做大田实验，结果表明 Bt 棉对优势寄生性天敌造成严重的危害。中棉所 30 中棉铃虫幼虫寄生性天敌齿唇姬蜂和侧沟绿茧蜂的百株虫量分别较常规棉对照减少 79.2% 和 88.9% 。用 Bt 抗虫棉饲养的棉铃虫中寄生的齿唇姬蜂的寄生率和出蜂率分别较常规棉对照减少 91.4% 和 37.5% ，茧重和蜂重分别减轻 54.0% 和 11.1% ；侧沟绿茧蜂的寄生率较对照减少 57.1% ，蜂茧重减轻 44.2% ，且其茧不能出蜂。可见，Bt 抗虫棉对棉铃虫幼虫优势寄生性天敌的寄生率、羽化率和蜂茧质量造成严重危害。但是却可能能够有效地保护增殖捕食性天敌。与对照相比，Bt 中棉所 29 品种的百株七星瓢虫数量减少 14.0% 、龟纹瓢虫减少 8.5% 、草蛉增加 14.0% 、小花蝽减少 1.6% 、草间小黑蛛增加 15.9% ，差



图 4-10　转基因抗虫棉实验田
（图中实验田分为 4 个处理，1. 使用农药（化控）；2. 不用农药（自控）的转基因棉田；3. 使用农药（化控）；4. 不使用农药（自控）的常规棉田）

异均不显著；Bt 中棉所 30 品种棉田的龟纹瓢虫数量增加 11. 8%、小花蝽减少 30. 4%、草蛉减少 20. 0%、草间小黑蛛减少 3. 6%，研究人员认为差异均不显著。但两种转基因棉田的捕食性天敌总量均较相应的对照明显地增加，说明种植 Bt 棉能有效地保护增殖捕食性天敌。棉花所的研究人员又做了饲养实验，结果表明龟纹瓢虫、七星瓢虫、草间小黑蛛和大眼长蝽对用 Bt 棉叶片饲喂 1. 2h 棉铃虫初孵幼虫的日最大捕食量为对照的 1. 5 ~ 3. 0 倍，处理一头猎物的时间为对照的 33. 3% ~ 66. 2%，瞬间攻击率为对照的 1. 1 ~ 1. 4 倍。说明用 Bt 棉饲喂棉铃虫后能提高天敌对棉铃虫的捕食率。

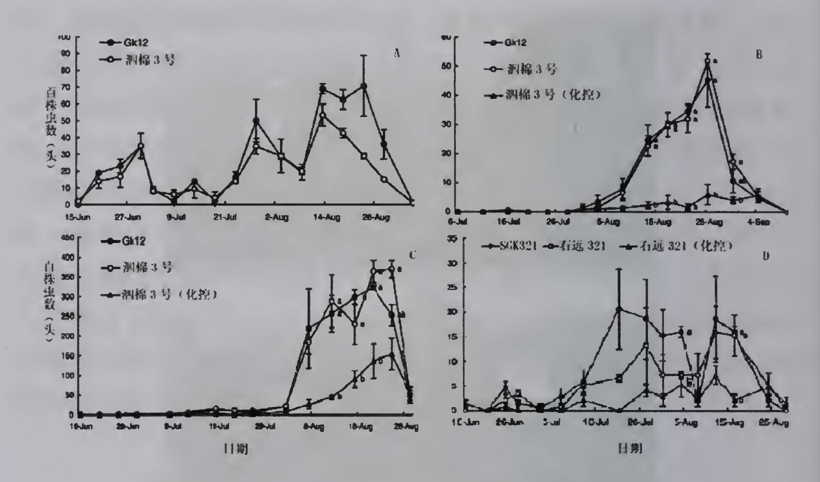


图 4-11　棉田次要害虫——盲蝽象在转基因田中上升为主要害虫（GK12 和 SGK321 分别为转基因品系，泗棉 3 号和石远 321 分别为相对应的非转基因系。A、B、C、D 分别为 1998、1999、2000、2001 年的田间动态，化控的意思是适时喷洒农药。资料来源：*Crop Protection.* 2002，21：997 ~ 1002）

有实验说明在转基因 Bt 棉田中当棉铃虫少时，棉田次要害虫会上升成为主要害虫（图 4-10，图 4-11）。另外，根据国家环境保护总局的项目“转基因棉花环境释放对生物多样性的影响调查、试验和对策”的总结报告认为，Bt 棉对靶标害虫——棉铃虫有较好的抗性，但是对棉铃虫以外的主要害虫的效果很差，尤其是对刺吸式害虫基本上没有效应。在转基因抗虫棉田，当靶标害虫棉铃虫受到控制以后，非靶标的次要害虫如棉蚜、红蜘蛛、棉蓟马、盲蝽象、甜菜夜蛾、斜纹夜蛾、白粉虱等的发生比非转基因棉田严重，有的已经上升为最主要的害虫。并且，转基因棉田昆虫群落、害虫和天敌亚群落的均匀性和稳定性不如非转基因棉田，某些害虫大发生的几率增大。

五、关于“黑脉金斑蝶”事件的始末的介绍

1999年，Losey等学者在著名的科学杂志《自然》杂志上发表了一个实验室水平上简单但影响深远的实验。他们用一种黑脉金斑蝶，又称大斑蝶，也称君主斑蝶（*Danaus plexippus*）。这种蝴蝶的幼虫的唯一食物是马利筋属（*Asclepias*）的杂草。由于这种杂草在玉米田内或田边有大量分布，玉米扬花时花粉可随风飘60米远。在杂草叶片表面上撒落有相当密度的花粉。研究人员以撒有与自然界同样密度的转基因Bt玉米花粉的马利筋叶片喂饲黑脉金斑蝶，并以同样条件的正常玉米花粉和不加花粉的马利筋叶片作为对照。每张叶片上放上5条3日龄的幼虫，每个实验重复5次。4天后记录马利筋叶片的消耗量、虫子的成活率及幼虫的重量。

> 非靶标效应，字面上理解是指非预期或非目的效应。由于转基因抗虫植物开发伊始，只能设计对特定的害虫有效，该特定害虫称靶标害虫。但是转基因抗虫植物也可能对其他害虫，以及昆虫天敌和蜜蜂等其他生物产生影响，在描述转基因抗虫植物的安全性时，就将那些未预计或非期望的影响统称非靶标效应。

喂有Bt玉米花粉马利筋叶片的幼虫第二天就有10%以上死亡，4天后死亡44%，而两个对照全部存活。幼虫对不同处理的马利筋叶片摄取量也明显不同，摄取不加花粉的叶片量最大，而加Bt花粉的叶片摄取量少了很多。由于叶片摄取量少，幼虫生长就缓慢，实验结束时摄食Bt玉米花粉叶片的幼虫重量平均只有无花粉叶片的一半（图4-5）。

研究人员认为这虽是实验室的结果，但有深层的内涵。因有

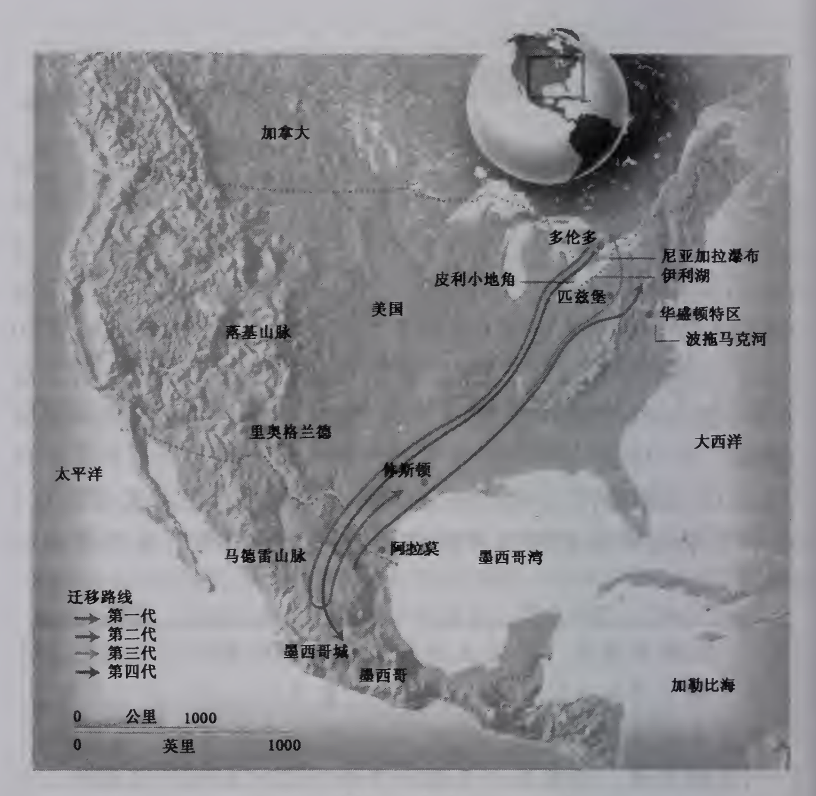


图 4-12　黑脉金斑蝶迁徙路线图

（黑脉金斑蝶每年都要经过美国的中西部在墨西哥和加拿大之间迁徙。其幼虫的进食期与玉米花粉散落期是重叠在一起的。图片引自《神奇之旅》. N. Marven 著，王玉山等翻译。）

上亿的黑脉金斑蝶每年从美国的东北部经过中西部到墨西哥中部 Oyamel 森林中越冬（图 4-12，图 4-13）。这一点最近已被用稳定性同位素的实验证明了。中西部是美国的玉米种植带，黑脉金斑蝶迁移经过的时间是 6 月下旬到 8 月中旬，此时是蝴蝶幼虫叶片喂饲阶段，又是玉米开花和扬粉季节（图 4-12）。如果实验结果

能适用于大田的话，则对黑脉金斑蝶物种生存将可能造成重大的威胁。



图 4-13　在墨西哥美洲松林越冬的黑脉金斑蝶
（蝴蝶在地表（下方）和美洲松树干（上方）上覆盖了一层。密度高达每公顷 1 400 万只，可以说是自然界中的奇迹。图片引自《神奇之旅》. N. Marven 著，王玉山等翻译）

然而，也有持不同意见的。Losey 等的文章一发表出来，就受到来自部分学者的批评，批评的主要问题是文章中所用的转基因玉米的品种中，Bt 蛋白在花粉中的含量比较高，这类品种不久将退出市场，并且文章中未能指出 Bt 蛋白的具体含量，而且实验是在实验室内进行的，是否能够代表田间水平大受怀疑，因为作

者所用的叶片表面花粉粒的浓度远大于田间情况。有研究指出，黑脉金斑蝶确实每年都要在玉米扬花季节从美国和加拿大向墨西哥迁徙，途中会经过玉米种植带。但是，黑脉金斑蝶并不会聚集在玉米田周围产卵，在自然地和耕作地的黑脉金斑蝶数量没有区别，而且玉米花粉的传播距离比较有限，并且落在马利筋杂草叶片的花粉粒的浓度达不到致死浓度，况且还有可能被风吹雨打掉。

但是，几乎与 Losey 等的工作同时，美国爱荷华州（Iowa）州立大学的昆虫学家在网上公布了类似的大田实验的结果。实验用的 Bt 玉米包括同属于诺华种子公司的花粉含高浓度 Bt 蛋白的品种（Event 176），也包括花粉含低浓度的玉米品种（Bt11）。他们用的马利筋叶片是玉米田内或田边收集的，用的黑脉金斑蝶的幼虫是刚孵化出来的。实验结果说明无论是花粉含高浓度品种还是低浓度品种，都对黑脉金斑蝶的幼虫产生致死影响，而非转基因玉米花粉处理的幼虫无一个死亡的。

另外，美国堪萨斯（Kansas）大学昆虫学家 Taylor 发表文章认为如此快速地大面积种植抗除草剂转基因大豆和玉米，将会造成大田中马利筋种群的减少。由于马利筋是黑脉金斑蝶类蝴蝶幼虫唯一的食物来源，因而会对黑脉金斑蝶的生存造成威胁。例如用草甘膦等除草剂以常规方式来除掉玉米或大田草中的杂草，只能在下种前来喷洒，这种方式还可让大量的马利筋照常生存。孟山都（Monsanto）等公司开发了抗除草剂转基因作物，在作物发芽并生长后还要喷洒除草剂，从而大量杀死马利筋及其他难以除掉的杂草。在美国，1999 年已有近一半的大豆面积已种植抗除草剂转基因大豆。如此大量种植后，将使马利筋群丛大大地减少，随之而来就会威胁到黑脉金斑蝶的生存。已有研究证明发现到墨西哥越冬的 50% 的黑脉金斑蝶是来源于中西部内布拉斯加州（Nebraska）和俄亥俄州（Ohio），这地区是美国玉米和大豆的主

要产地。

康奈尔（Cornell）大学生态和农业科学教授 Pimental 和密苏里（Missouri）植物园主任 Raven 对 Losey 等的工作发表了截然相反的意见。他们认为目前能得到高产农业的重要原因是因为大量使用杀虫剂、除草剂、杀菌剂和化肥。这些化学物质除了对作物有利以外，也杀死了有益的昆虫、鸟、鱼，也污染了水并引起其他环境和公众健康问题。在美国，由于使用杀虫剂而引起环境和公众损失总值每年达 90 亿美元。农民通常就是通过斩草除根、用除草剂或改变耕作方式来除掉马利筋等杂草，并且农业上所用的杀虫剂和除草剂不仅威胁到黑脉金斑蝶，同时也威胁到有用的益虫，每年要杀掉 10% 左右在农田生活的鸟类（在美国约6 700 万只鸟）。面对这么严重的问题不顾，而去推测马利筋叶片由于污染了 Bt 玉米花粉而成为使黑脉金斑蝶种群受到威胁的一个主要原因，他们认为是一种极端的无根据的结论。他们也承认 Bt 抗虫蛋白对蛾子和蝴蝶是有损害的，并提出是否可让转基因植物的花粉中不表达毒蛋白，或转基因植物产生其他抗虫蛋白来替代 Bt 抗虫蛋白。他们也主张不管是 Bt 毒蛋白喷剂还是转基因植物表达 Bt 毒蛋白所产生的环境效应都需要继续进行测试和评估。

第五章　害虫和转基因抗虫棉

转基因生物的环境风险的另外一个方面是科学家担心靶标害虫有可能进化出对转基因抗虫作物产生抗性，从而可能使转基因作物对害虫失去控制。

一、"雾里看花"抗虫棉——转基因棉花的困惑

1996年，美国南部20000英亩Bt棉失去对棉铃虫的控制，消息传出，孟山都公司占股份的专营棉花种子的岱字棉公司（Delta & Pine Land co.）的股票一天内下降18.5%。普遍认为，害虫可能已经对抗虫棉产生了抗性，但是孟山都公司认为怀疑害虫对Bt毒蛋白产生了抗性是没有科学依据的，认为当年气温较高是导致棉铃虫大发生的原因，并劝告从俄克拉荷马州（Oklahoma）到佐治亚州（Georgia）的棉农准备喷洒杀虫剂，以免受更大损失。

我国转基因作物主要种植的是转基因抗虫棉（包括美国孟山都公司的和中国农业科学院的产品）。转基因抗虫棉推广的速度很快，在主要棉区都有转基因棉存在（图5-1），现在大部分的棉花种植地区已经很难买到非转基因棉花的种子。在国内，转基因抗虫棉的靶标害虫主要是棉铃虫，目前国内种植抗虫棉的农民普遍反映，虽然转基因棉田的棉铃虫的数量降下来了，但是由于减少了用药的次数，一些非靶标害虫如红蜘蛛、斜纹夜蛾等的数量升了上来，而且抗虫棉对棉田3、4代棉铃虫的控制效果不好。虽然转基因抗虫棉能够减少杀虫剂的用量，但是，抗虫棉的品质和产量有时不如常规非转基因棉，影响了收入。在印度，在近期也出现了抗虫

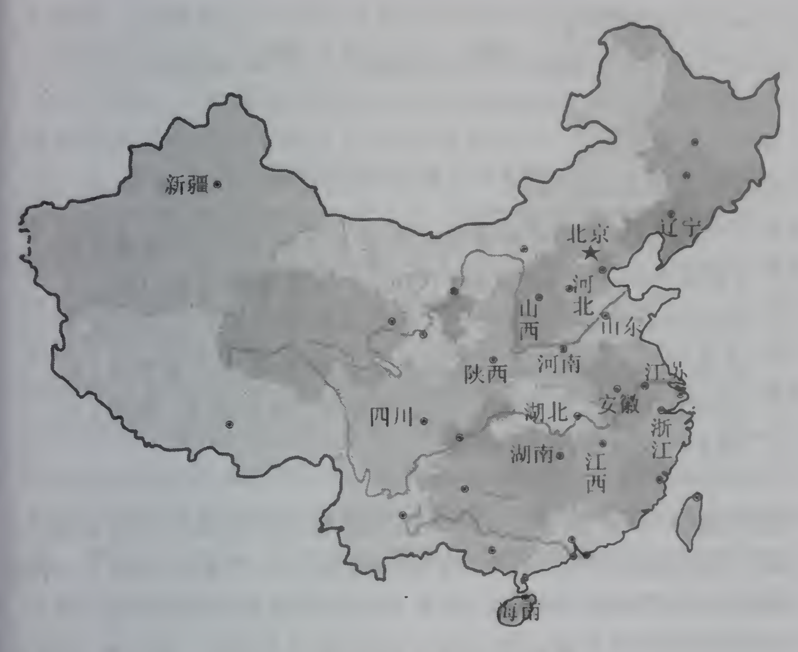


图 5-1 转基因抗虫棉分布示意图

棉种植效果不好的情况。据报道，印度在第一年正式商品化种植Bt 棉花以来，在棉花结铃期普遍出现了植株的萎蔫发干现象，叶子下垂并脱落，并且未成熟棉铃出现爆裂现象，严重影响了棉花的产量。有人认为是当年气温太高的原因，而有专家指出，插入外源基因会影响受体植株基因组的表达，批评转基因生物开发人员对分子生物学的"中心法则"(图 5-2)理解过于简单，没有意识到如果仅仅是插入一个基因不一定能得到预期结果这个可能情况。

转基因抗虫棉的确能产生一些效益，如据一个报道，国产 Bt 棉能够减少农药使用量 80% 左右，每公顷增加净收益 1 800 元以上。但也有相反的报道，国家环境保护总局的调查报告显示，转基因抗虫棉在各地的表现不一，总的来说，打药的次数并没有减少，尤其

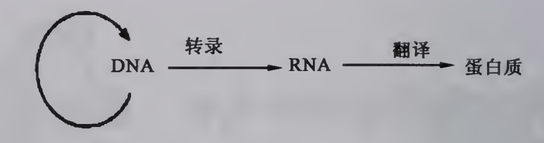


图 5-2 “中心法则”示意图

核酸是携带生命遗传信息的主要物质,分为核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)。根据中心法则,DNA 上的遗传密码会先转录 RNA,再转译成蛋白质。从今天观点来看,中心法则在描述基因表达方面显得过于简单了,基因的表达由很多直接或间接因素间(如蛋白质、核酸)的相互作用决定的。

是在高温天气,产量会有下降。而且转基因抗虫棉的品质如绒长、衣分和强度都比常规棉差。在棉铃虫发生不严重的情况下,种植常规非转基因棉在产量和品质上比转基因棉有较大的优势,但是,在调查中也反映出农民在心理上惧怕棉铃虫,担心棉铃虫大爆发的年份,可能造成巨大损失,所以比较倾向于转基因抗虫棉,尽管经济上不优越,但可能会避免重大损失。然而,他们不了解 1996 年美国南方的转基因抗虫棉在棉铃虫大爆发的时候,也遭受了巨大的损失。

反对者和支持者各执一词,谁也无法说服对方。对于转基因棉对昆虫天敌的影响,有的研究专门强调应该比较转基因棉田与常规防治非转基因棉田(即采用常规杀虫剂的棉田),在这种情况下,前者的捕食性昆虫天敌的数量是多于后者的,而有的研究比较强调应该对比转基因棉田与非转基因不施药棉田,在这种情况下,一般来说,转基因田中的捕食性昆虫天敌的数量低于非转基因田。但是转基因抗虫棉田也需要喷洒杀虫剂。也有人认为转基因抗虫棉田可能需要喷洒较少的杀虫剂,所以就对昆虫天敌只造成很少

的伤害。但情况也不尽然,虽然在美国的亚利桑那州(Arizona),针对靶标害虫棉铃虫的杀虫剂施用从1994年每公顷3次降到2000年每公顷0.1次,但在阿拉巴马州(Alabama),针对靶标害虫——棉铃虫的杀虫剂施用量从1997年到2000年,几乎增加了1倍。一般来说,控制其靶标害虫的杀虫剂由于转基因抗虫棉的引入而会大量减少,但是其他种类的杀虫剂可能不会减少,有时反而会大量增加的情况。还是以美国为例,表5-1中可以看出美国棉田各种杀虫剂的使用总量在商品化种植的第一年(1996年)比上一年只是略微下降,但在1999年比1998年翻了两倍还多,2000年与1999年相差不大,并未看出由于抗虫棉的商业化种植而降低杀虫剂使用的趋势。根据美国国家科学研究委员会(National Research Council)的建议,认为评价转基因抗虫作物对非靶标生物体的影响必须与当时采取的防治对策相联系,包括用农药和不用农药的措施。根据这个建议,在评价转基因抗虫作物对非靶标生物体包括昆虫天敌的影响时,比较转基因化控(施农药)田与相应非转基因化控(施农药)田的效果可能是比较合适的,而在这样的比较下,根据目前的研究数据,差异可能是不显著的。就是说与化学杀虫剂相比,转基因作物的使用可能显示不出对昆虫天敌有显著的有益性。

表5-1　1992~2000年美国棉田杀虫剂使用总量(磅/公顷)

1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年
1.09	1.18	1.73	1.71	1.25	1.39	1.26	2.96	2.82

注:1磅=0.4536千克

(资料来源:http://www.biotech-info.net/Table3_cotton_pounds.pdf)

二、害虫为什么能对Bt蛋白产生抗性呢

世界范围内,大约有67 000种害虫危害农作物,其中约9 000种是昆虫和螨类,自从施用化学农药防治农业害虫以来,曾经取得

了良好的控制害虫效果。然而，现在有500多种昆虫和螨类对化学农药产生了抗性，而且化学农药还给环境和人类健康带来了危害，因此生物防治受到广泛的重视，其中来源于苏云金杆菌（*Bacillus thuringiensis*）的生物杀虫剂（*Bt*）由于其专一性强，对环境无害并且对人、畜安全，已在许多国家和地区推广使用。图5-3是一种Bt蛋白的结构图，不同的罗马数字（I，II，III）表示不同的结构组成（亚基），不同的阿拉伯数字（1～9）则表示不同的受体结合位点。



图5-3　一种Bt蛋白晶体结构图，昆虫的中肠上皮蛋白就结合在图中所示的"受体结合位点"上。（资料来源：Structure with Folding & Design，2001，9:409～417）

但是，Bt杀虫剂也有其局限性：①这种杀虫剂的生产比较昂贵；②它的应用需要农业机械；③每个生长季一般都需要重复喷洒若干次，阳光可以降低Bt杀虫剂有效成分；④降水或露水也会冲洗掉植株上的杀虫蛋白，从而缩短Bt杀虫剂的效用时间。另外，在20世纪70年代晚期和80年代中期，人们发现一系列的Bt产品对防治烟芽夜蛾（*Heliothis virescens*）等棉花的害虫效果并不好，经过研究发现，Bt制剂只能喷到作物表面，而这类害虫在花和棉铃内部生活的时期比较长，并且Bt毒蛋白只有被害虫食用后才有毒效。如同化学农药的命运一样，昆虫对Bt杀虫剂也发生进化而产生了抗性。

迄今在实验室选择条件下对Bt杀虫剂产生抗性的害虫有以下几种：①鳞翅目——烟芽夜蛾，甜菜夜蛾，海灰翅夜蛾，粉纹夜蛾，小菜蛾，地中海粉螟，粉斑螟，向日葵斑螟，印度谷螟，枞色卷蛾；②鞘翅目——黑杨叶甲，马铃薯甲虫；③双翅目——埃及伊蚊，五带淡色库蚊，黄猩猩果蝇，家蝇。欧洲玉米螟在实验室选择条件

下也表现出了对 Bt 杀虫剂的抗性。其中，只有一种害虫——小菜蛾在田间进化出对 Bt 的抗性，并且从美国的夏威夷、佛罗里达、纽约，到菲律宾、泰国和马来西亚的田间种群以及日本的温室种群中都报道了小菜蛾对 Bt 的抗性。中美洲的田间种群也报道了对 Bt 的抗性。其他 15 种害虫仅在实验室选择的条件下发现了对 Bt 的抗性。

随着基因工程技术的飞速发展，很多的作物都转入了 Bt 基因以达到抗虫的效果。表 5-2 列出了迄今为止主要的转 Bt 植物以及它们的靶标害虫。但是从表中可以看出，很多的靶标害虫已经在实验室条件下进化出了对 Bt 杀虫剂的抗性，据国内的一项研究表明，抗 Bt 杀虫剂的棉铃虫品系同样对转 Bt 棉也有抗性。由于转 Bt 作物能够持续地高水平表达单一的杀虫毒蛋白，因而 Bt 作物的释放将可能会加速昆虫的抗性进化。

表 5-2　转 Bt 基因作物概况

作物	Bt 基因	靶标害虫
烟草	*cry*IA(a)	烟草天蛾
	*cry*IA(b)	甜菜夜蛾、棉铃虫
	*cry*IA(c)	烟芽夜蛾
	*cry*IC(a)	甜菜夜蛾
	*cry*IIIA	马铃薯甲虫
番茄	*cry*IA(b)	烟草天蛾、美洲棉铃虫、番茄蠹蛾
	*cry*IA (c)	鳞翅目昆虫
马铃薯	*cry*IA(b)	马铃薯麦蛾
	*cry*IA(c)	烟草天蛾
	*cry*IIIA	马铃薯甲虫
茄子	*cry*IA(b)	茄白翅野螟
	*cry*IIIA	鞘翅目昆虫
棉花	*cry*IA(b)	烟芽夜蛾、美洲虫等
	*cry*IA(c)	鳞翅目害虫
	*cry*IIA	鳞翅目害虫
玉米	*cry*IA(b)	巨座玉米螟、小蔗螟
玉米	*cry*IA(b)，*cry*9C	欧洲玉米螟
	*cry*IA(c)	亚洲玉米螟
	*prt*A	鳞翅目害虫
	*cry*IH	鞘翅目害虫
苜蓿	*cry*IC(a)	海灰翅夜蛾、甜菜夜蛾
	*cry*VIA	鞘翅目害虫
花生	*cry*IA(c)	南美玉米苗斑螟
大豆	*cry*IA(b)	黎豆夜蛾
	*cry*IA(c)	美洲棉铃虫、烟芽夜蛾、黎豆夜蛾、大豆夜蛾
白花三叶草	*cry*IA(b)	*Orocrambus flexuosellus*
	*cry*IB	*Porina moth* (*Wiseana* spp.)

（续）

作物	Bt 基因	靶标害虫
花茎甘蓝 卷心菜	*cry*IA(c)	小菜蛾
甘蓝型油菜	*cry*IA(c)	小菜蛾、粉纹夜蛾、棉铃虫、甜菜夜蛾
葡萄	*cry*IA(c)	鳞翅目害虫
山楂	某种 Bt 基因	苹果蠹蛾
唐棣	某种 Bt 基因	鳞翅目害虫
梨	某种 Bt 基因	苹果蠹蛾
甘蔗	*cry*IA(c)	小蔗螟
草莓	*cry*IA(c)	鳞翅目害虫
杨树	*cry*IA(a)	森林天幕毛虫、舞毒蛾
胡桃	*cry*IA(c)	鳞翅目害虫
白云杉	*cry*IA	枞色卷蛾
酸果蔓	*cry*IA(a)	鳞翅目害虫
水稻	*cry*IA(b)	二化螟、稻纵卷叶螟
	*cry*IA(b)	三化螟、二化螟、稻纵卷叶螟和 *Marasmia patnalis*
	*cry*IA(c)	鳞翅目害虫
苹果	*cry*IA(b) *cry*IA(c)	鳞翅目害虫
芜菁甘蓝	*cry*IA(a)	菜粉蝶

注：表中 Bt 基因的名称按照 Hofte 和 Whiteley(1989)的分类。
（资料来源：应用与环境生物学报. 1999,5(2):215 ~ 228）

1. Bt 蛋白为什么能杀死害虫呢

为了研究害虫对 Bt 抗性产生的原因和机制，首先应该了解 Bt 毒素为什么能杀死害虫，也就是杀虫机理是什么?。

害虫在摄食 Bt 杀虫剂中的杀虫晶体蛋白后，在中肠碱性条件下二硫键打开，在肠道胰蛋白酶的作用下激活形成抗蛋白酶的毒性核心片段，才有活性。在转基因植物体中，为了提高表达量，所转入的基因都是经过修饰的，所表达的 Bt 毒蛋白是已被活化的蛋白。

活性毒素与中肠上皮的刷状缘膜囊上的中肠受体蛋白结合。Bt 活性蛋白与中肠上皮细胞结合后，能够穿透细胞质膜形成一个离子通道(孔)，依 pH 值的不同，这些通道(孔)具有选择性(仅钾离子可通过)和非选择性(钠离子和阴离子可通过)。由于鳞翅目昆虫的中肠是碱性的，因而这些孔很有可能有钾离子渗漏，这种阳离子通道损坏了膜电势，细胞膨胀并裂解，导致中肠坏死，围食

膜和上皮退化变性，肠壁受损后，中肠的碱性高渗内含物进入血腔，血淋巴 pH 升高而导致昆虫麻痹死亡。

一般来讲，抗性产生的机制总体上可分为生理、生化、行为三方面的因素，这几方面的机制与遗传控制因素紧密联系的。转 Bt 基因作物与害虫抗性进化的关系有些类似于植物与食草动物之间的协同进化：植物进化出一种新的化学防御的方法来逃避食草动物，而食草动物则能够产生共进化，设计出一种机制，来适应抗食草动物的植物。

抗性进化指生物体在逆境条件压力下的行为或生理生化等方面逐渐获得适应或耐受性的过程。抗性进化是有遗传基础的。一般认为，个体发育的延迟会加速耐受性的进化，而抗性代价将会延迟抗性的进化。

抗性代价指在没有选择压力下，抗性个体的适应度低于非抗个体的适合度。

2. 害虫在生理生化方面产生那些变化来应对 Bt 蛋白

生理与生化机制密切相关，因此我们将它们放在一起讨论。目前对抗性机制研究的重点集中在蛋白质水解作用和结合位点的变化上。许多研究表明，抗性的增加与昆虫中肠上皮（BBMV）上可能受体与毒素特异性结合的降低有关。另外，在 Bt 毒素作用途径的许多步骤上都可以产生抗性机制。抗性机制的发生可能仅局限于 Bt 对昆虫杀伤途径上某些作用因子的量变，而非整套特异性作用机制的突变。我们将 Heckel（1994）列出的可能产生抗性机制的毒素发生作用的各个阶段以及抗性的生理生化机制略加改动，用于阐述害虫对 Bt 作物的抗性机制（表 5-3）。显然，毒素的溶解和活化对于 Bt 杀虫剂的效力是至关重要的。然而，对于 Bt 作物来说，由于转入的 Bt 基因都是经过修饰或人工合成的，其表达产

物可能并不需要激活作用而直接与靶受体结合而发挥毒效。虽然如此，为了对问题有个较全面的认识，我们还是将原毒素的溶解作用和激活作用保留在表 5-3 中。

3. 害虫能改变行为来应对 Bt 蛋白吗

如果在时空上 Bt 毒素的浓度有差异，那么行为上尽量减少摄食将会构成一种抗性机制。表 5-3 中第 10 个机制即是一种行为抗性。对害虫和 Bt 作物的关系来说，害虫可以改变行为形成避免有毒植株或有毒的部分。

有学者曾提出一个问题，棉铃虫是以棉花和大豆为食的，如果突然面对大面积的、能够导致 80% 死亡的抗性棉花（比如 Bt 棉），棉铃虫是在生理上产生适应而使抗性棉（Bt 棉）失去价值，还是在行为上适应转而去以大豆为食，对大豆的取食是否可能只引起较少的损失并且易于控制？这个问题很难回答。实际上生理生化抗性机制和行为抗性机制可能同时存在，以哪种机制为主要应依具体情况而定。

表 5-3　害虫 Bt 抗性可能的生理生化机制及其特性[*]

受影响的阶段	抗性的本质	保护程度[a]	交叉抗性[b]	是否隐性[c]	代价[d]
1. 溶解[e]	失去作用	中等	+	+	高
2. 激活[e]	未完全蛋白质水解	中等	+	+	高
3. 激活	蛋白质过度水解	中等	+	−	中等
4. 接近靶受体	竞争性抑制	中等	−	−	中等
5. 靶位点结合	靶位点初级结构变化	高	−	+	中等
6. 靶位点结合	靶位点修饰（糖基化作用）	高	−	+/−[f]	高
7. 离子通道的形成	阻碍	中等	+	+	?
8. 离子通道的功能	堵塞	高	+	−	低

（续）

受影响的阶段	抗性的本质	保护程度[a]	交叉抗性[b]	是否隐性[c]	代价[d]
9. 中肠上皮损伤	生理学克服	低	+	?	?
10. 害虫对 Bt 剂量的识别[g]	行为变化	低	+	?	?

注：a. 该机制为害虫提供保护的程度：低、中等或高。

b. 该机制是否对其他毒素提供交叉抗性？ +：有交叉抗性，－：无交叉抗性。

c. 该机制是否隐性？ +：隐性；－：非隐性，?：表示未知。

d. 撤去毒素后抗性机制的相对适应代价：高、中等或低，？表示未知。

f. 该机制如果由正常的糖基化作用的失败而引起就是隐性，如果由一个新的糖基化作用引起就是非隐性。

g. 对 Bt 作物来讲，害虫主要采用在时空上转变宿主的对策。

（资料来源：应用与环境生物学报. 1999，5(2)：215～228）

在墨西哥的一种 Bt 玉米中，CryIA(a)蛋白的表达需要光的条件并由 PEP 羧化酶启动子启动。由于心叶见光少，害虫就可能能够忍受低量表达的 Bt 毒素，因此在研究中发现，害虫一般都在心叶中生活。

4. 害虫 Bt 抗性的遗传机制

抗性的产生应该是以遗传为基础的。害虫 Bt 抗性的生理生化机制是与遗传机制紧密联系的。受体分子结构的变化将使毒素与受体的结合能力降低（表 5-3，机制 5、6）是抗性遗传机制最直接的证据。至于害虫的行为抗性机制可能是一种生活习性改变的结果，有无遗传基础尚无定论。

研究发现，小菜蛾中一个抗性基因的存在可以对 4 种 Bt 毒素产生抗性，当然还需要进一步的研究来确定产生这种多毒素抗性的遗传因素是一个位点，还是几个紧密连锁的位点，研究人员指出这个证据排除了这样一个观点——这些毒素的抗性需要各自独

立的分离位点上的突变。在对小菜蛾的大多数实验室选择和田间选择的研究中发现，昆虫对 Bt 的抗性是半隐性或完全隐性的。

害虫快速适应一种杀虫剂的风险主要依靠田间野生种群中的初始抗性等位基因频率。后者一般指在没有种植转基因抗虫作物前,田间靶标害虫基因组中能够产生对抗性作物耐受性的等位基因的存在频率。目前广泛应用的抗性频率是 $10^{-13} \sim 10^{-2}$，它是基于突变—选择理论的一个估计值。这个理论认为:有利选择前,任何一个等位基因的频率由突变产生的新等位基因和对杂合体的选择之间的平衡保持在种群中。当然选择也应该作用于纯合个体，但由于纯合个体的稀少而被忽略不计。然而，实际情况并不像人们用理论模型来预测的那样。有人发现小菜蛾中的初始抗性等位基因频率为 0.12，10 倍于目前所广泛引用的感性群体中初始抗性等位基因频率的估计值。有学者通过采自美国 4 个州的烟芽夜蛾的雄性与实验室的抗 Bt 的雌蛾杂交，并观察 F_1 和 F_2 代对 Bt 毒蛋白的忍受能力，估计到田间抗性等位基因的初始频率为 1.5×10^{-3}，并指出他们的这种技术能够提高检测隐性抗性等位基因频率的能力。隐性纯合个体存在的概率是 P^2（P 为隐性抗性等位基因频率），远远小于杂合个体存在的概率 $2 \times P \times (1-P)$，能够检出隐性纯合体意味着敏感度提高了 2 000 倍。这样做对确定隐性抗性等位基因的初始频率是非常重要的。前人根据遗传学模型估计抗性基因的初始频率时将抗性隐性纯合体忽略不计，这个错误导致低估了隐性抗性等位基因的初始频率。

昆虫害虫的 Bt 抗性的遗传机制比较复杂，但为了使问题简化，原先一般认为抗性是受一个单一位点上的一个稀有的初始等位基因控制,然而有一些新发现,例如，马铃薯甲虫对 CryIIIA 蛋白的抗性与一个以上的位点有关。为了更好地研究害虫 Bt 抗性的遗传机制，建立 Bt 抗性与标记位点的连锁图是一个比较有用的方法。我们可以用连锁作图来研究复杂的 Bt 抗性机制。它有如下用

等位基因:一个基因的不同形式,每种形式具有独特的核苷酸序列。

显性等位基因:无论是在纯合还是杂合状态下对其表型性状的表达的影响相同的等位基因。

隐性等位基因:只有在纯合的状态下才能表现其表现型的等位基因,显性等位基因的存在会掩饰隐性等位基因的表达。

等位基因频率:某等位基因占同一位点上所有等位基因的比例。

途:①能够明确地检出不同的抗性机制;②用标记来帮助鉴定和分类抗性位点,这一点在抗性发生在几个特异位点上时特别重要;③可以确定抗性位点的显隐性;④检测出若干个位点以后,这些标记可以用来研究这些位点是如何相互作用提供抗性的;⑤用于交叉抗性的分析;⑥用于特异性等位基因适合度代价的研究。

而有的科学家认为如果能对害虫的抗性基因本身进行研究,获得一种简易的 DNA 方法来检测抗性基因的存在,就能够为农民提供一个早期预警工具,使农民能够及时停止种植转基因 Bt 作物而在一段时间内改用化学杀虫剂,从而可有效地延迟抗性的进化。目前已经有了一些重要的研究成果,如科学家在一种线虫体内克隆了抗 Bt 蛋白 Cry5B 的抗性基因,而在毒性区域,Cry5B 与目前商品化的 Cry1Ac(即 Monsanto 公司转基因抗虫棉的表达产物)等杀虫蛋白有一定的同源性。也有科学家则在棉花的主要害虫——烟蚜夜蛾中发现了由反转座子介导的突变导致了对 Bt 蛋白 Cry1Ac 的抗性,而由反转座子插入引起的突变很容易检测,这样就可能使建立以 DNA 为基础的方法检测隐性基因来筛选抗性杂合子。

三、我们的对策

延迟害虫对 Bt 作物抗性的管理策略主要有以下几种：Bt 作物的轮作、开发新的毒素基因、避难所、毒素高剂量表达、毒素低剂量表达、转入多种杀虫基因以及毒素在时空上的特异表达，以上各种管理策略在实际应用中应该是互为补充，相辅相成的。

1. 作物的轮作

虽然与 Bt 杀虫剂不同，Bt 作物一般具有持续的毒素表达，但是 Bt 作物的轮作，即与含有不同 Bt 毒素基因的作物或非转基因作物间的轮作，将会有助于害虫抗性的延迟。这个策略的有效性依赖于当选择压力不连续或者变化成另外一种毒素时，害虫种群对该选择压力敏感性的恢复。当用含有不同杀虫毒素基因的作物进行轮作时，要注意交叉抗性的问题。当然轮作的周期、面积等尚需根据害虫的不同、转基因作物的不同而进行细致深入的研究。

2. 高剂量方法

高剂量方法就是使转基因作物的毒素表达量在一个高水平上（大于 LC99，即超过 99% 的致死量），在理论上，昆虫克服这种毒素需要很长的时间。这个方法假设大多数或全部的抗性是隐性的，并且大多数的抗性携带者是杂合的，甚至预计抗性纯合体也将被高水平表达的毒素杀死。高剂量方法最好与避难所结合起来应用。当多种转基因作物和多种害虫分布在同一地区，并且作物受到两种以上的害虫的侵害，而这几种害虫对毒素的敏感程度不同，同时同一害虫能够以两种以上的作物作为宿主时，问题就变得比较复杂，结果就更加难于预测。

3. 避难所策略

避难所是指在转 Bt 作物附近种植一定面积的非转基因作物，来保证敏感性昆虫的存活，并与潜在的抗性个体交配，从而降低抗性基因频率增大的可能性。避难所有时间意义上还有空间意义上的，它在每种害虫与植物的相互作用关系中都是独特的，避难所可以位于同一植株的不同部分和不同发育阶段上，也可以存在于不同植株上(混合种子)或不同的种植地中(图 5-4)。一般地，避难所和高剂量方法是结合在一起应用的。

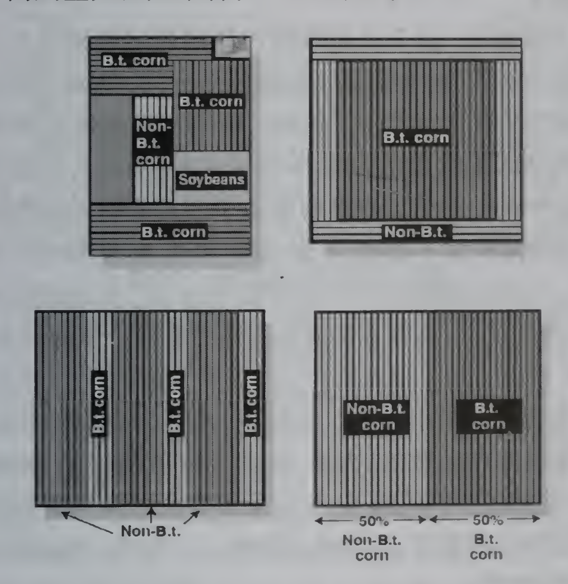


图 5-4　美国孟山都公司建议的转 Bt 基因抗虫玉米的避难所种植模式

(B. t. corn 指转基因品系，Non-B. t. corn 指非转基因品系，Soybean 是大豆的英文名称。资料来源：孟山都公司 2003 年技术指南)

高剂量策略和避难所策略的结合的基本原理如下:消除抗性基因最有效的方法是将目标定在携带杂合抗性基因的害虫上，原因是种群中大多数抗性基因是以杂合状态存在，杂合抗性昆虫和纯合的感性昆虫都可以被高剂量表达的 Bt 作物杀死;在提供感性昆虫存活的一个避难所的条件下，纯合抗性个体和纯合感性个体间的交配导致杂合后代的产生，而杂合后代对 Bt 作物是敏感的，所以,设计一个避难所诱使纯合抗性个体和纯合感性个体进行交配非常重要。

在这个策略中，由于在避难所中使用非转基因作物，害虫的危害可能会比较严重,会造成一定的经济损失。因此，有人设计了一种改进型“高剂量/避难所”策略，他们在转基因作物地中使用一种对欧州玉米螟有吸引力的 Bt 玉米品种,吸引 6 月份的蛾子到 Bt 玉米地中产卵，避免了避难所中由于使用非转基因作物而造成的损失，很好地控制了害虫对 Bt 作物和非 Bt 作物的危害(图 5-5)。然而，如果在选择压力下害虫在行为上产生逃避这种有吸引力的 Bt 作物的抗性,这种方法的实用性尚需进一步的研究。

表 5-4 列出了为了延迟抗性，在美国上市的 5 个 Bt 作物品种所需要的避难所的最小面积。在国内,由于各种农作物的种植基本上是小规模的和分散的,因此,有的专家就提出来,除新疆棉区外,全国其他棉区在种植转 Bt 基因抗虫棉花时不需要单独种植非转基因棉花作为避难所,其他的农作物——玉米、大豆等可以作为害虫的天然避难所。

也有学者指出,棉铃虫对 Bt 有较低的敏感性，所以对棉铃虫应用“高剂量/避难所”的方法是不合适的。对于 Bt 不敏感的害虫需要较大面积的避难所来延迟抗性。在通常情况下，玉米也是棉铃虫的宿主，玉米田可以作为 Bt 抗性管理的避难所，但当 Bt 玉米商业化以后，这种情况就可能不复存在了。同时，为了避免棉铃虫抗性的加速，美国国家环境保护局已严令禁止 Bt 棉与 Bt 玉米

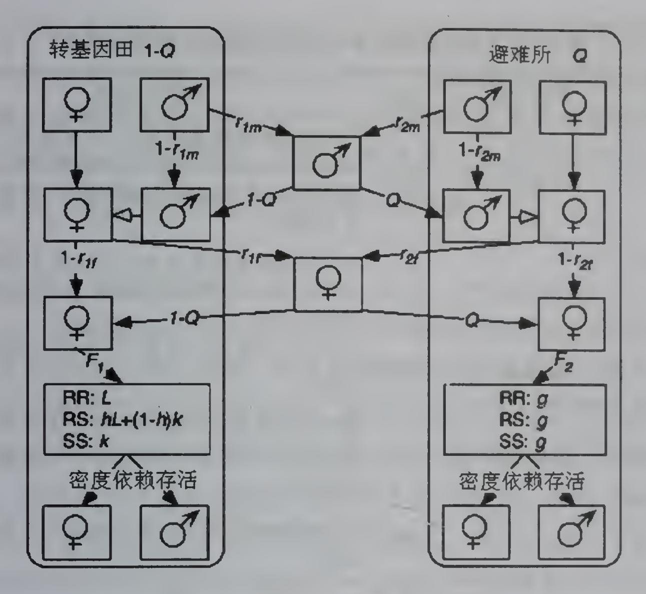


图 5-5　避难所工作原理示意图

(r_{1m}和 r_{2m}分别为雄蛾(♂)从 Bt 玉米田和避难所扩散的比例,r_{1r}和 r_{2r}分别为交配雌蛾从 Bt 玉米田和避难所扩散的比例,然后它们按 Bt 和非 Bt 玉米田面积(Q 和 1 − Q)的比例重新分布。雌蛾(♀)在 Bt 玉米田和避难所中分别产下 F_1 和 F_2 代卵。纯合抗性(RR)、纯合敏感(SS)以及杂合抗性(RS)的幼虫在 Bt 田中的存活率分别为 L,k,hL + (1 − h)k,h 是抗性显性表达系数,所有的基因型在避难所内有相同的存活率(g)。两块田的幼虫都要经历密度依赖存活。资料来源:Ecology Letters, 2002, 5:792 ~ 801)

邻近种植。

表 5-4 不同 Bt 作物中延迟抗性的最小避难所面积

公司	产品名称	作物	避难所面积
Monsanto	Bollgard™	棉花	25% 面积的非转基因棉花(如果需要,可以用任何杀虫剂,但不包括与转基因棉相同的 Bt 杀虫剂措施)或 4% 的非转基因棉花(不用任何的杀虫措施)。
	Nature Gard™	玉米	使用对欧洲玉米螟有 99% 以上水平的致死高剂量对策;并且建议使用 5% ~50% 面积的非转基因玉米。
	Newleaf™	马铃薯	20% 的非转基因马铃薯(若需要,可用任何杀虫剂)。
Novartis	Maximizer™	玉米	使用对欧洲玉米螟有 99% 致死量水平的高剂量对策;并且建议种植 5% ~50% 面积的非转基因玉米。
Mycogen	Yield Gard™	玉米	5% 面积的非转基因玉米,避难所中不用任何杀虫剂。

4. 转入多个杀虫基因

在转基因抗虫作物研究中，除了开发新的 Bt 毒素蛋白基因外，尚可利用其他的抗虫基因，如蛋白酶抑制剂基因，包括豇豆胰蛋白酶抑制剂(CpTi)基因、马铃薯蛋白酶抑制剂 - II(PinII)基因和水稻巯基蛋白酶抑制剂基因，淀粉酶抑制剂基因，外源凝集素基因等等，可以将它们与 Bt 基因一起转入作物，具有不同结合位点的两种以上的 Bt 基因也可同时转入同一作物，用于提高转基因抗虫作物延迟害虫抗性的能力。然而这个策略的应用需要避难所的协助配合，其中的一个原因就是防止多个抗性基因产生交叉抗性。

5. 低剂量方法

一般地，我们可以这样假设，一种植物抗性因子降低食草动

物适应的程度愈低，食草动物适应这个抗性因子的速度愈慢。低剂量的毒素表达的目的是降低选择压。亚致死的剂量将会降低害虫种群的育性和生长，并且使得受到影响的害虫易于被捕食和寄生。但从商业的角度来看，低剂量毒素表达导致的作物的损失不能被接受，因此这种方法已被有关公司弃用。

6. 杀虫毒素的目标表达

这个策略就是在作物某一部分或作物发育的特定时期特异地表达杀虫毒素。研究表明，棉花需要防护的最重要部分是幼棉铃，如果杀虫毒素仅在幼铃中表达，棉铃虫幼虫就会依赖其他部分，可引起较少的损失。这个方法将允许很多感性昆虫正常地生长和繁殖，因而增加了它们的捕食者和寄生者的数量，同时，植物的主要部分或主要的生活史阶段能够免受损失。然而，也有不同意见，如果组织特异性启动导致毒素在一些组织中高量表达，在另外一些组织中低量表达，那么害虫的抗性将会被加速而不是延迟，这是因为害虫可以利用不同生活史阶段的不同组织而导致害虫被分化选择。但随着对基因调控的深入了解，这一策略将作为避难所和高剂量策略的补充而有可能得到广泛应用。

四、害虫对 Bt 蛋白抗性会自动消失吗

目前，许多抗性选择试验是在实验室进行的，而实验室选择结果往往不能代表田间情况，特别是当实验室种群的遗传变异与田间相比较时，实验室选择条件下不能产生抗性并不意味着田间选择条件下也没有抗性的发生。

当抗性选择停止后，不同昆虫(种或品种)对 Bt 抗性的稳定性是不相同的。例如，对印度谷螟选择 9 代后，抗性群体用不加 Bt 的饲料喂养，7 个世代中抗性并没有下降，表明抗性选择了一个纯

合的抗性品系，或者抗性对繁殖并没有什么显著的不利。

在小菜蛾中，当选择停止时，其 Bt 抗性缓慢降低。而对于马铃薯甲虫来说选择压力撤去 5 个世代以后其抗性水平下降，12 个世代以后抗性水平不再下降。当去掉选择压力后，抗性水平下降的原因可能是提供 Bt 抗性的遗传变化在没有 Bt 的选择条件下会给害虫造成一个适应代价，当选择停止时，这个代价会引起混合种群中抗性的下降。当然，基因流(感性个体的迁入和抗性个体的迁出)、突变和遗传漂变同样也会降低种群中抗性个体的频率。

突变:指基因组中发生的任何可检测到的变化。自然界中普遍存在着突变,每个基因都有一定的突变率。

遗传漂变:在随机条件下,某一等位基因频率在群体(尤其是小群体)中出现世代传递的波动现象,也称为随机遗传漂变。这种波动变化导致某些等位基因的消失,另一些等位基因的固定,从而改变了群体的遗传结构。

第六章　风险和惠益的谈判

一、惠益明显、矛盾尖锐

转基因作物大面积商业化种植几年来，经济惠益是十分明显的。可是转基因植物及其产物一旦成为商品后，问题就不仅仅局限在其是否有生态风险及是否对人体健康有影响等科技界争论的科学问题，而必然涉及到经济、贸易，甚至政治问题。下面我们将分别作些介绍。

1. 转基因作物的惠益

转基因作物的惠益是十分明显的，从图 6－1 可以看到在 1996 年时全球转基因作物销售收入约 3 亿美元，到 2000 年时达到 30 亿，成直线上升，有人预计到 2010 年时价值达到 300 亿美元。下面有一些数字可能说明问题。如在美国，1996 年时 70% 的转基因 Bt 棉花不再喷洒杀虫剂，产量提高 70%，每公顷节约 140～180 美元；美国原来每年约有一半的玉米田（3 200 万公顷）受棉铃虫损害，损失金额达 10 亿美元；而种植转基因 Bt 玉米后，产量提高 9%，经济效益在 1997 年达 190 万美元。在加拿大，在 1996 年时种植了 1 200 万公顷耐除草剂油菜后，产量提高 9%，经济效益达 600 万美元。中国种植转基因抗虫棉花，山东梁山县 1998 年时作过一个统计，该县种植转基因抗虫棉 1 500 公顷，每公顷增产皮棉 375 千克，价值 4 500 元人民币；增产棉籽 600 千克，价值 750 元人民币；减少农药费用为 900 元人民币；节约劳

动力1 500元人民币，估计总共经济效益在1 100万元人民币以上。如果以此类推，当年全国种植转基因抗虫棉累计的经济效益达10亿元人民币，5年来累计为农民增加收入在50亿元人民币以上。

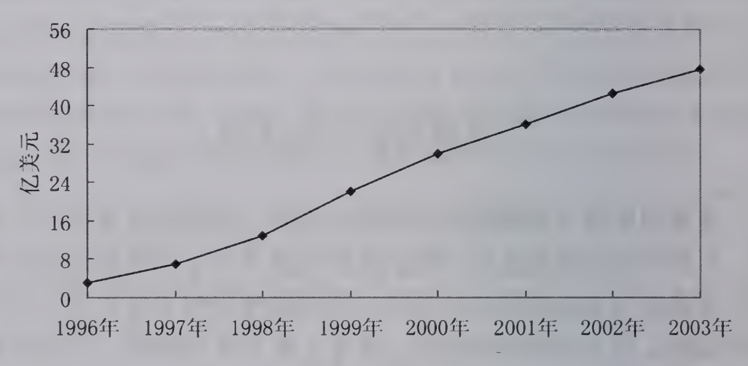


图6-1　全球转基因作物销售收入

2. 与经济、贸易、政治的关系

进入21世纪后，在经济、贸易与政治上的矛盾似乎更为突出，不少国家出于种种原因加大了对美国转基因作物的进口限制。每年都要进口大量食品的阿尔及利亚有可能全面禁止转基因食品的进口、生产和销售。每年从美国进口价值110亿美元食品的日本，已经对24类产品制定了严格的转基因产品标识的规定。韩国政府2001年实施“转基因农产品、加工食品标识制”的措施后，美国贸易官员在对韩国农林部和食品医药品安全厅访问中，认为韩国制造两国的贸易技术壁垒，尤其是每次通关要确认转基因产品与非转基因产品的“区别流通证明书”的条款使美国增加了许多费用，要求放宽条件。实际上欧洲、日本和韩国已经在很大程度上转向从巴西和中国购买非转基因的大豆和玉米。美国政府和农场主承认，转基因作物已经使出口受到严重的打击。他们担心价值400亿美元左右的食品出口工业，会因为其他国家

设法出口自己食品取代美国食品而蒙受损失。鉴于许多国家不接受转基因食品，美国农业部在 2001 年将玉米出口的预测调低了 5 000万蒲式耳（1 蒲式耳约等于 36. 4 升）。

现在再来谈谈我国的情况，中国是世界大豆原产地之一，遗传多样性也非常丰富。据资料报道，1978 年我国改革开放后，美国大豆育种专家到我国各地收集了大量野生资源，其中有东北的长有密密白毛的野生大豆的一个类型。美国育种家把这类型与栽培大豆杂交，培育出抗旱的新品种，比原有栽培大豆节水 15%，能在较贫脊干旱的土地上栽培，扩大了种植面积，使美国成为世界上最大的大豆出口国。20 世纪 90 年代后抗除草剂转基因大豆大面积商业化种植后，成本就更低，出口量就更多。而大豆在过去曾作为中国大宗商品出口，现在由于市场大量的需求及绝大多数品种出油率低于美国大豆，中国却成为大豆的进口国，进口数量逐年增长，到 2002 年时进口数量已接近本国的年产量，达到 1 500万吨，其中多数是美国的转基因大豆。进口量如此之大，使我国种植大豆的豆农以及整个大豆产业受到极大的冲击。撇开基因污染的因素，如此大量的进口也将扼杀我国整个大豆产业。2002 年 1 月我国农业部颁布了有关转基因作物及其产品的标识制度等规定后，大豆贸易问题成为来访美国国家领导人与我国领导人谈判重要内容之一。

为了振兴我国整个大豆产业，国产大豆已经打出“非转基因”牌，如黑龙江九三集团已在他们的大豆油产品上贴上“非转基因大豆”（图 6-2）；另一方面育种单位在加速培育出好的大豆品种，与进口转基因大豆争夺市场。黑龙江八一农垦大学最近育成了非转基因优质高含油量大豆品种“垦农 18”，并研究成功全套栽培技术及配套农业机械，该品种含油量高达 23. 98%，比进口转基因大豆高出 2% ~3% 。

美国市场上虽然已有 4 000 种以上的转基因食品，政府对在



图 6-2　黑龙江九三集团的标志为非转基因食品的大豆色拉油
（图片引自该公司的宣传材料）

其本土上有关转基因作物及其产物的处理还是非常谨慎，也是采取预先防范的原则，凡是不按照政策规定来办的，处理是相当严格的。下面进一步剖析前面提到的两个例子，以说明其对经济损失的影响。

前面提到的美国安万特作物科学公司（Aventis CropScience Company）研制的一种转基因抗虫玉米，商品名称为星联（StarLink），这种转基因玉米中被检测出含有一种 Cry9C 的蛋白质可能使部分人引起皮疹、腹泻及呼吸系统的过敏反应，并且还具有潜伏效应。1998 年经美国环境保护署批准可进行商品化生产，但规定只能作为动物饲料，不能作人类食品用。然而，在 2000 年 9 月间，在超市货架上的 Taco 玉米饼皮（图 2-3）和其他谷物食品中被检测到微量的“星联玉米”成分，在美国及世界上都掀起了不小的风波。因为在外观上对转基因玉米及常规玉米是无法辨识的，美国农业部决定 2000 年当年全国的玉米全部以转基因玉米论处。在美国，转基因玉米的价格低于常规玉米，从而造成种植

常规玉米农民以及中间商蒙受很大损失。该事件也影响到澳大利亚、韩国、日本等国对美国玉米的进口，美国出口商受到数百万美元的损失。为了解决与消费者的集体诉讼，安万特公司和几个食品制造商同意支付 900 万美元，但这并未了结农场主们由于受到损失要求赔偿的单独诉讼。

2002 年 10 月美国发生了转基因玉米混进了普通大豆事件。美国有一些生物技术公司利用植物作为生物反应器进行药物的生产，用以治疗糖尿病、艾兹病和老年痴呆症等疾病。位于内布拉斯加州的 ProdiGene 公司利用转基因玉米进行胰岛素蛋白生产，已进入到田间试验阶段。该公司在 2001 年种植了不到 1 英亩的这种转基因玉米的地块在第二年用于种植常规食用大豆，但对上一年收获时残留在田间的转基因玉米种子发芽后的苗及植株未去除干净，当食用大豆收割时有一部分转基因玉米污染了约 500 蒲式耳的大豆，收获的大豆又被送到一个谷仓中与另外 500 000 蒲式耳大豆混合。美国农业部立即隔离了总金额达 270 万美元的大豆。因为根据美国政府规定，生产作为药物或工业用途蛋白的转基因植物的产物是不能作为食品供人们食用。虽然大多数摄入的蛋白很快会被人体消化，但有些蛋白可能会有足够长的时间存留在人体，从而危害到人体的健康。医药用途的转基因作物的产物是不允许被用作人的食物或牲畜的饲料。科学家也曾多次告诫，这类转基因植物如果被批准商业化生产大面积向环境释放，也很可能通过基因流污染常规的农作物，也有可能在运输及仓储过程中与食用作物种子混杂到一起，因此还是有相当风险的。对此次事件，美国政府官员表示这些混杂了转基因玉米的大豆很可能会被烧毁或转化为燃料，经济损失也将会是不小的。

转基因作物及其产物在一定程度上还涉及到政治问题。上文提到星联玉米在美国本土是被禁止作为人类食品，可是美国在 2002 年时把这批转基因玉米作为援助物资运抵玻利维亚等拉丁美

洲国家，作为帮助这些国家解决饥饿问题，被西班牙的媒体揭露出来。在给妇女、儿童、老人、农民和印第安人的人道主义援助捐赠品中检测到“星联”玉米的成分，同样情况发生在尼加拉瓜和危地马拉，在援助食品的所有抽样检查中都存在着上述同样的成分，特别是在给孕妇和学龄前儿童的援助中也发现了这种食品成分。

转基因作物问题的争论还有可能威胁到政府的决策。例如，2001 年，对于政府是否应批准在大田中做转基因作物的试验，新西兰各政党的争议十分激烈。新西兰绿党坚持认为政府不应该批准，而以工党为执政党的政府在国会中仅占有不到一半的席位，有关法律和财政提案的通过，要能获得多数票必须有绿党和新西兰第一党的支持。尽管政府正在制定有关遗传工程的政策，由于党派对转基因作物态度不一致，反对党对政府施加压力，影响到最后决议的作出。

二、还有其他风险吗

转基因技术除了生态风险和对人体健康有可能带来风险外，实际上世界上有不少国家把这项技术用于军事目的。生物武器虽然早就应用，当然现在还是有用的，但应用重组 DNA 技术后，这风险就更应值得重视了。下面我们给大家介绍基因武器和农业战争。

1. 基因武器

利用释放大量的致病细菌或病毒引起敌方的人畜在短时期内发病，从而失去战斗力，这种武器就是生物武器。生物武器是在第一次世界大战期间发展起来的，当时马是战场上重要的动力和运输工具，德国人释放鼻疽病和炭疽病菌，使英国和美国的牲畜

受到一定的创伤。这导致了 1925 年禁止生物武器的《日内瓦公约》的签署。虽然当时一些大国都在公约上签了字，但实际上并未阻止生物武器的研制，第二次世界大战时日本在中国的 731 部队研制生物武器并在中国人身上做实验这一滔天罪行就是例证。二次大战后，进入大规模的核对抗时期，生物武器一时暂居次要地位。虽然进入冷战时期，1972 年又达成了《生物武器公约》，可是不少国家都还在研制各自的生物武器。进入 20 世纪 90 年代后，前苏联解体，冷战结束，两极世界瓦解，美国在全球占据了前所未有的支配地位。一些国家无法在常规战争中对抗美国，出现了所谓“不对称战争”的局面。在这种形势下，生物武器由于其材料、设备等投资相对小得多，又可在医药研究的幌子下隐蔽起来。由于体积小作战时的机动灵活，更便于恐怖主义分子通过各种手段进行活动，以上的优点使生物武器再一次引起各国的重视。尤其是 2001 年美国“九·一一”事件后在佛罗里达州又发生了炭疽事件，再一次敲响了生物武器可怕的警钟。军事专家认为我们现在已面临着生物战大灾难和生物恐怖主义兼而有之的时代。生物武器已被认为是廉价的原子弹，甚至比核武器更厉害。

军事专家有以上的认识是由于随着生命科学以及基因工程技术的发展，生物武器已经进入到基因武器时代。通过基因工程可以克隆出能够杀死特定农作物或者家畜的毒素，从而使一个国家的经济陷于瘫痪。不同种族人群的基因构成是不一样的，有些人的基因构成决定着他们容易感染某种疾病，例如镰刀型细胞贫血症只发生在地中海沿岸的高加索人种和非洲人。因此通过基因工程可以克隆出具有选择性的毒素来杀死特定种族的人群，这就是被称为所谓的“种属炸弹”。2002 年 9 月俄罗斯报曾报道，联合国曾紧急派遣法国一家研究所的医生和科学家去非洲，因为一个岛上已有 2000 人感染了一种怪病，并已夺走了马达加斯加 157 人的生命。其症状类同普通感冒，患者剧烈头疼，肠胃消化系统严

重失调，两天就会死亡。6 月份时曾流行过，奇怪的是被感染的只是一个民族。

基因武器是科学技术发展到今天的生物武器，有人认为目前已到了实用阶段，应该引起警惕。一些外国公司正在借研究之名收集我国民间血样，所以，在 2000 年底时，中国科学院、卫生部、科技部和中国社会科学院的专家呼吁联合国发布一份中国基因研究正当行为的声明，以限制某些境外研究公司的“基因侵权”行为。专家提醒，某些外国基因公司骗取中国人血浆用于科研活动的现象应引起全社会的警觉。

2. 农业战争

美国岱字棉种子公司和美国农业部联合向美国专利局申请一项技术保护系统的专利，1998 年 3 月这技术被美国专利局以“植物基因表达的控制”的名称批准。国际农业促进基因会称这项专利为“终止子技术”（terminator technology），通过这项技术获得的种子称为“终止子种子”。该项技术大致的程序是：科技人员把终止子基因插入到作物中得到转基因作物的种子，种子公司在种子出售前在种子中加入一种诱导剂，农民把种子播下去后，长出正常的植株，并能收获成熟的种子。这种种子在油脂、蛋白质等各个部分完全正常，只是胚胎已经被杀死，因此农民不能把这种种子作留种用。

在国外，出售的玉米种子都是杂交种，杂交种只能种一年，第二年再种就开始大量分离，因此种子收获后不能用作留种，农民每年都要向种子公司购置杂交种。留种用的转基因玉米种子，由于高技术的应用可卖到更好的价格，投资者不仅收回了投资，并能获取高额利润。可是小麦、水稻、大豆以及棉花等作物都不是卖的杂交种，转基因作物出售一次后，农民可以继续留种，不存在每年都要再买种子问题。投资者的初衷似乎是为了追求高额

利润，运用了基因工程的手段创造了终止子技术，使作物第一年种后得到的种子是不育的，不能留种作为第二年再种的种子。这技术实际上是为了对转基因保护的一种措施。

这项专利在美国国内、一些国际组织，尤其是第三世界国家引起了强烈的反响与争论。1998 年 10 月国际农业研究磋商小组在美国华盛顿召开会议，明确提出为了保护世界食物的保障，禁止终止子技术。该组织明确指出该项技术的目的就是要让农民不能留当年收获的种子作下年播种用，这对贫穷的农民来说他们付不起每年大量购买高价留种的种子的金额。更严重的问题是种植具终止子基因作物后，携带终止子基因的花粉会随着各种媒介而侵入到农民的土地中去，不管这些农民是拒绝还是无能力买这技术都有可能得到这样的花粉，其后果是一方面造成农民使用的品种成为不育的，而影响到遗传多样性的降低。另一方面受携带终止子基因花粉影响的作物，当年是见不到影响的，农民不可能去识别哪些种子是可育的，哪些是不育的，都留种作为来年播种用，当发现某些种子是不育时已为时过晚，已造成了减产。如果这技术是通过隐性基因传递时，则会可能出现以后若干年无规律的收成，从而造成当地农村社区食物保障的受损。

终止子技术说明，掌握了先进农业生物技术的国家已经可以是否加入或者喷洒化学物质（例如上面提到的诱导剂）来使控制植物各种性状的基因开启或者关闭。有人推测，这类技术可用到打一场农业战争，用来打击农田中的作物，例如减少大米蛋白质含量，提高木薯中氰化物含量，使小麦提早萌芽，或者让作物疯长叶子而不结种子，这样对作物的种植将是破坏性的。

三、管理者的责任

20 世纪 80 年代开始，一些发达国家对重组 DNA 技术及其产

物在本国开始制定有关的法规及条例来进行管理。如美国，由政府颁布生物技术管理协调框架文件，由 5 个管理部门即农业部、食品药品监督管理局、国家环境保护局、国立卫生研究院和职业安全与卫生管理局分别制定细则来对转基因生物及其产物进行管理。1997 年农业部下属动植物检疫处颁布《基因工程生物及其产品管理条例》，同年国家环境保护局也颁布了《生物技术微生物产品管理条例》。美国的转基因生物批准大面积商业化生产都要经过农业部、国家环境保护局以及食品药品监督管理局，对某一个具体对象可能有主有次，但必须都有三个部门的意见。加拿大是由食品检验部、环境部、卫生部和渔业与海洋部来负责转基因生物及其产物的管理。欧盟国家对转基因生物及其产物进行了严格的管理，对基因工程技术制定了法规，对转基因生物及其产物的实验、环境释放及商品化都作了严格的规定。欧盟各成员国根据欧盟制定的法律框架又制定了一系列的实施条例。由于消费者强烈反对转基因生物及其产物，欧洲是目前世界上管理最严的地区。

一些国际组织及联合国下属有关组织，如经济合作与发展组织（OECD）、世界卫生组织（WHO）、世界贸易组织（WTO）、以及联合国粮农组织（FAO）等对转基因生物及其产物的管理都提出了有关原则。管理问题还以公约的形式列入到 1992 年的联合国环发大会通过的《生物多样性公约》的条款中。为了更好地实施，条款中还建议要有一个生物安全议定书。在 1995 年 12 月在埃及开罗，联合国环境规划署（UNEP）主持制定的《国际生物技术安全技术准则》，由政府指定专家全球协商会议上通过并正式发布。该《准则》在制定议定书期间将作为临时机制，并在议定书完成后起指导作用，协助各国建立生物技术改性活生物体（LMOs）及其产物的风险评估及风险管理，以及信息系统等生物安全管理能力。国际上第一部有关转基因生物及其产物的管理法

规——《生物多样性公约卡塔赫纳生物安全议定书》经过长期艰苦谈判终于在2000年通过。该《议定书》主要涉及的是国际间转基因生物及其产物贸易安全问题。《议定书》是按照1992年联合国环发大会《关于环境与发展的里约宣言》的原则15所规定的预先防范原则来制定的。各缔约国可以依据该原则采取限制或禁止进口活性转基因生物及其产品的措施，还可以要求在装运活性转基因生物及其产物时必须附有标识。

我国对转基因生物及其产物有关的第一部条例是1993年12月由国家科学技术委员会发布的《基因工程安全管理办法》，这是一部比较原则的《办法》，从技术角度对转基因生物进行宏观管理。我国对转基因生物的批准主要是由农业部管理，该部于1996年7月颁发了《农业生物基因工程安全管理实施办法》，主要从保护我国农业遗传资源、农业生物工程产业和农业生产安全的角度，对转基因生物的实验室研究、中间试验以及环境释放或商业化生产进行管理。在UNEP/GEF资助下，国家环境保护总局承担了《中国国家生物安全框架》的任务，并出版了该框架（图6-3）的任务，目前已经进入具体实施阶段。该《框架》从国家生物安全管理政策体系、法规体系、生物技术改性活生物体及其产物风险评估和风险管理的技术准则以及国家能力建议四个方面来进行制定，《框架》的初衷是希望成为今后一段时期中国生物安全管理的指导性文件。2001年5月23日国务院总理朱镕基签署第304号中华人民共和国国务院令，公布了《农业转基因生物安全管理条例》（图6-4），规定了国务院农业行政主管部门负责全国农业转基因生物安全的监督管理工作，并建立农业转基因生物安全部际联席会议制度；规定列入农业转基因生物目录的农业转基因生物，由生产—分装单位和个人负责标识，未标识的不得销售；并规定农业转基因生物标识应当说明产品中含有转基因成分的主要原料名称等等。《条例》的颁布，为转基因生物及其产

物的安全使用打下了重要的基础。

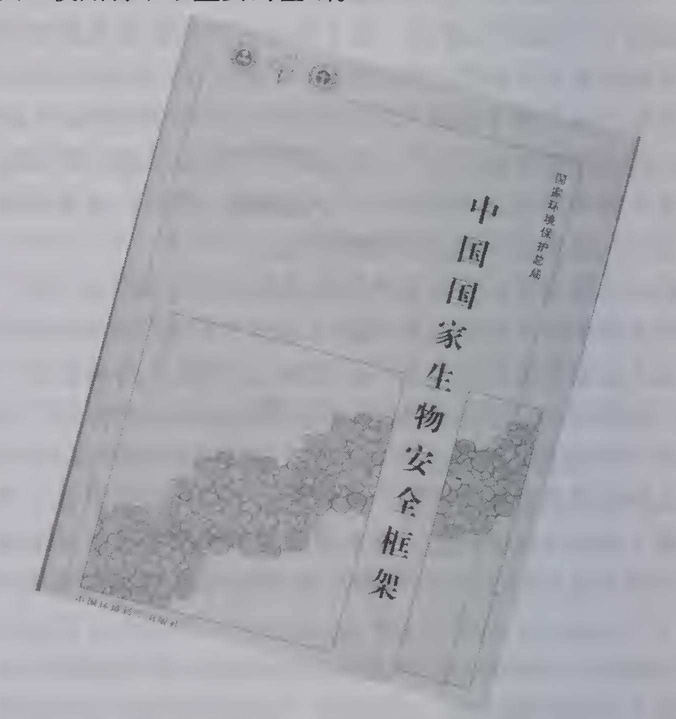


图 6-3　中国国家生物安全框架

（国家环境保护总局于 1999 年完成的《中国国家生物安全框架》，2001 年 12 月被 GEF 理事会批准，并于 2002 年 9 月启动。）

政府部门除了制定条例或法规外，下列几个问题也是应该重视的。

（1）加强执法的问题　上面谈到美国 ProdiGene 公司大豆被转基因污染的事件，根据报道来看，美国农业部执法是非常认真的，农业部发言人说他们的检查员发现该大豆地中有不属于大豆

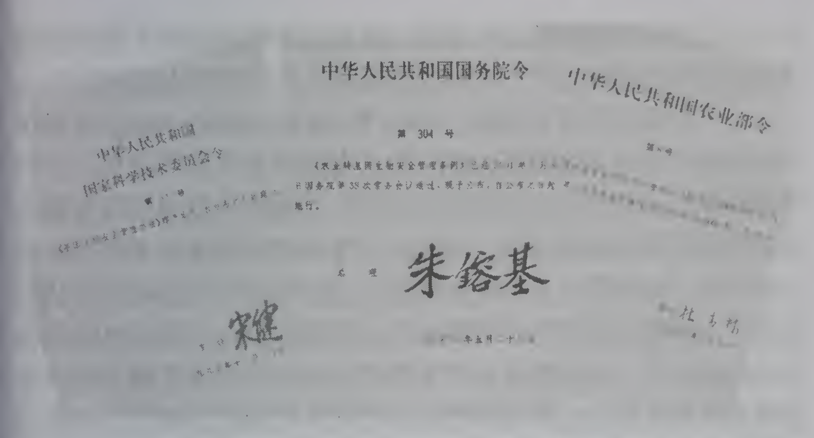


图 6-4　国内不同时期颁布的几个主要的生物安全管理条例

的谷类作物，并通知该公司将这些谷类作物全部清除。但是该公司并没有清除。在收割了大豆后，农业部检查员在大豆中发现了混合有相当于一玻璃杯份量的未知玉米作物的茎叶，美国农业部立即隔离了大豆。农业部高级官员称，他们在大豆收割后 24 小时内发现了问题，马上采取行动禁止所有大豆和玉米进入食物供应。但是在一个商用谷仓中，少量有问题的大豆已经混进了本地农场储藏的大豆中。

另据报道，根据农业部的统一部署，北京已经采取自查与监督抽查相结合的方式，开展了农业转基因生物安全管理执法检查，检查范围包括北京行政区域内生产、加工、分装或销售的列入第一批标识目录的 5 大类 17 种农业转基因生物的标识情况，从事农业转基因生物试验和研究单位对安全管理法规的执行情况，进口企业、加工企业、批发市场和超市等销售企业将成为重点检查对象。由于我国从美国进口大量的转基因大豆，因此重点是对大豆进口、加工、销售企业的相关产品进行抽检。《农业转基因生物安全管理条例》和配套规章将可进一步得到贯彻落实。

上面是两个执法很好的例子。条例或法规制定后不执行或执法不严就等于没有。每个国家应该根据各自的国情认真地执法。

（2）加强宣传报道引导　2000 年 12 月，北京一个发行量很大的媒体作了如下的报道，题目为“本报记者驱车百余里，寻找转基因草”。记者在北京近郊见到 6.67 公顷由某农业科技有限公司从美国引进的转基因草，在宣传了这草的一系列优点后，最后一句话是“转基因，让小草也疯狂”。这个报道至少有两个问题：①任何一种转基因植物种植到几个公顷的面积，必须经过政府有关部门的批准，可该报道上并未提到过一句，给读者留下的印象是转基因生物的种植是不需要经过任何政府部门的批准，造成了错觉；②如果一旦这种小草真的疯狂起来，就有可能通过种子传播到大量的农田里成为杂草，后果将是花费大量的人力、物力和资金去除杂草。我们还不知道这种转基因草是什么物种，在北京是否有它的野生近缘种，如果真有野生近缘种，能够和这种转基因草杂交，将使原来不是杂草的野生近缘种成为杂草，其后果更是不堪设想。媒体是很重要的宣传工具，记者、编辑或主编们如果没有生物安全基本的知识，往往容易造成对读者的误导。个别媒体的记者为了造成哄动效应，不惜给某些个人戴上一些莫须有的帽子，这种做法更是不可取的（王晓玲，文晔　2002；卢家兴 2002）。

（3）建立引进审批制度　前面提到的转基因草的引进，不免让人联想到中国的大地会不会有可能成为发达国家的实验场所问题。转基因生物是一个新生事物，难免有的公司或个人看到或听到转基因生物好的一面，为了各种不同的目的，有意无意地像引进转基因草一样，引进各种转基因生物，不经过政府有关部门的批准就任意在大田中大面积的种植起来。我们也不能排除这样的情况的存在，即一些发达国家的公司，通过种种手段把不允许在本国作田间试验的实验室成果拿到我国来做田间试验，甚至大面

积的种植。如果我们没有这样的警惕，中国大地成为发达国家转基因生物的试验场所不是没有可能的。如果某个转基因生物真有了外来入侵种的性状，问题更是难以解决。

（4）加大保护遗传资源力度 根据《中国生物多样性国情研究报告》的记载，起源于中国的谷类作物就有水稻、粟、黍稷、裸大麦、裸燕麦、蜡质种玉米和荞麦，此外还有小麦和高粱中国是次生起源地。中国是大豆的起源地，野生大豆资源丰富，很多省份都有野生大豆的分布，还有两种多年生大豆属的植物，即烟豆和短绒野大豆。其他小豆、饭豆、绿豆和长荚豇豆也起源于中国或中国是其起源地之一。至于纤维作物、蔬菜以及花卉植物也有不少是起源于中国或至少中国是起源地之一。前面已经介绍过转基因作物有可能通过基因流造成基因污染，从而对起源于中国的植物天然基因库造成损失，一旦造成基因污染，损失是不可弥补的。由于种种原因，我国的植物遗传多样性已经丧失了很多，要更加关注并努力避免由转基因作物造成遗传多样性的丢失。

（5）加紧推行标识制度 为了实施预先防范的原则，慎对转基因作物产物及其产品，同时也是为了增加透明度，让公民对转基因产物或产品有选择的权利，不少国家都实施贴标识办法，进入 21 世纪，包括我国在内实施这个办法的国家在不断增加。

韩国农林部自 2001 年 3 月 1 日起实行在转基因农产品上贴标识办法。同年 7 月 13 日起，食品医药品安全厅对以大豆、玉米、豆芽等作主要原料的，包括豆粉、玉米粉、干果类、豆腐、豆油类等 27 种转基因食品实施食品标识制度。以上商品必须标注“转基因原料制食品”或“包含转基因成分”等标记，若无法确认是否包含转基因成分时，则应标注“可能含有转基因成分”字样，使消费者容易识别。此外在产品的容器或包装上，要用与包装底色相区别的标签，并要求有文字标明。同时详细规定，食品制造、加工商，现货销售制造商，食品添加剂制造商，食品分销

商，流动专销商以及食品进口销售商等商界都有义务标注转基因标识。若发现虚假或未贴标识的转基因产品，将对以上商界首次停业 15 天至 1 个月、第二次 1 ~2 个月、第三次 2 ~3 个月的停业处罚。该规定有 6 个月指导性过渡期，对故意逃避标识或作虚假标识的商人将给予行政处罚。韩国在同年 9 月 1 日起对所有进口的大豆、玉米以及含有转基因成分的食品要求加贴“转基因”标识，并出具转基因检测证明。如不能及时出具转基因检测报告者，有关出口国的责任人将面临 3 年以下刑期或 3 000 万韩元罚款。据媒体报道，由于不了解韩国对进口商实施了此项新政策，北京王致和食品集团有限公司出口到韩国的腐乳和火锅调料被该国海关扣押，后经国内有关部门大力帮助下，这批商品最终才得以顺利过关。

我国农业部在 2002 年 1 月初发布了《农业转基因生物标识管理办法》，凡是列入标识管理目录并用于销售的农业转基因生物应当进行标识（见前面的介绍）。其他如欧盟、日本等许多国家对转基因食品都进行了严格管理。欧盟要求所有转基因食品必须有明显的标识。总之，标识制度让老百姓对转基因产物有了知情权、选择权。此外，一旦发生了问题，政府可以根据产地或厂名追根溯源，解决问题。

四、怎样对待转基因生物

重组 DNA 技术发展至今已有近 30 年历史，但与现有各种生物基因组的长期进化这一历史长河来比较，就显得太短了。这种技术尽管发展得非常迅速，给人们也带来美好的希望，可是到底还是一门新兴的技术，技术还不够成熟。人们在现有生物的基因组内人为地把外源基因插入，进行替换或者修饰，是否会有不利的影响，特别是否经得起时间的考验，目前还有待反复的试验、

观察，才可作出最后的结论。

在现阶段，不同人对转基因生物及其产物有不同的观点、不同的立场，这是非常正常的。宗教界中有的人士认为一切生命是上帝创造的，现在对生命进行改造是对上帝的一种亵渎，因此反对转基因技术。转基因作物发展得非常快的国家，为了要推销他们的转基因生物的产品，因此对转基因生物情有独钟，甚至可以国内外有别，把在国内禁止作为人类食品的转基因玉米作为救济粮恩施给一些国家正在受饥饿的人民。绿色和平组织执着于保护全球环境，认为转基因生物及其产物可能会破坏环境和有损人类健康；政府不同部门的官员，根据他所负责的任务，以及他对某种事物所了解的情况，决定了他的观点和立场。科技界人士也是一样，他们也会根据所从事的科研项目、不同的专业知识水平、或者即使专业相同，但对问题的认识角度不同，也会有完全不同或者截然相反的观点和立场。自然界存在生物多样性，人类社会对事物的认识也是存在多样性的。因此对转基因生物及其产物应该允许有不同立场的存在。有些人，认为对一切事物的立场都应当是与利益相联系的，其实完全不尽然，我们的态度应当是科学的、客观的。科技界中有些人的观点、立场也许与其经济利益相牵连，而也有相当数量的学者的观点与名利毫不相干，仅仅是从学术观点的角度来看待转基因生物及其产物这一新生事物。只要在不触犯法律的前提下，可以允许有不同观点的存在，允许讨论。

在转基因作物的潜在生态风险上，谁也没有预料到科学家的某些预见成为现实的时间会发生得如此之快。加拿大的抗除草剂转基因油菜大面积商业化生产才几年的时间，1998 年就发生了由于基因流造成的自播植物，即抗多种除草剂的自生自长的多抗油菜，科学家担心它有成为“超级杂草”的可能性。因为转基因植物不是自然界本来存在的，而是人工制造的植物，我们可以把它

看成外来入侵的品种。目前成为国际热点的外来入侵种的研究说明，这些入侵种要对环境造成危害往往有一个滞后期。滞后期的长短会按照不同物种的特性以及入侵的环境而异。短的可在 10 年之内，长的可能要 20 年甚至入侵 40 年后才让人认识到。可到那时才认识到是外来入侵种时，要消灭它为时已晚。像入侵到我国的紫茎泽兰，在某些环境下要消灭它已经是难以做到的了。

那么应该怎样来对待转基因生物呢？我们认为既要大力发展转基因技术，尽一切可能让它们服务于 21 世纪工农业的发展，推动经济的快速增长，也要对现在已经认识到的可能发生的潜在风险有足够的预先防范，严格立法、执法；加强宣传，让公众了解什么是转基因生物及其产物；增加透明度，实施标识制度，让群众对转基因食品有选择的自由。在这么一个严肃的科学问题面前，作为一个科学工作者，还是应该面对自然界的现象，不抱任何偏见地进行科学研究，在客观分析的基础上作出科学的报道，给政府决策者奠定科学的依据。因此，我们呼吁中国的科技工作者要保持高度的责任心，谨慎对待基因工程技术产品的生物安全问题。

参考文献

沃森 J. D. 等著. 沈孝宙 等译. 1987. 重组DNA简明教程. 北京：科学出版社

樊龙江，周雪平编著. 2001. 转基因作物安全性：争论与事实. 北京：中国农业出版社

卢家兴. 2002. 转基因食品：几家欢喜几家愁. 科学时报，2002-12-23 (4)

钱迎倩，马克平. 1998. 经遗传修饰生物体的研究进展及其释放后对环境的影响. 生态学报，18 (1)：1～9

钱迎倩，马克平. 1995. 生物技术与生物安全. 自然资源学报，10 (4)：322～331

钱迎倩，魏伟，桑卫国，马克平. 2001. 转基因作物对生物多样性的影响. 生态学报，21 (3)；338～343

钱迎倩，魏伟，田彦，马克平. 1999. 转基因作物在生产中的应用及某些潜在问题. 应用与环境生物学报，5 (4)：427～433

钱迎倩，马克平，桑卫国，魏伟. 1999. 终止子技术与生物安全. 生物多样性，7 (2)：151～155

钱迎倩，田彦，魏伟. 1998. 转基因植物的生态风险评价. 植物生态学报，22 (4)：289～299

生物多样性公约临时秘书处. 1992. 生物多样性公约. 瑞士，日内瓦执行中心

生物多样性公约秘书处. 2000. 生物多样性公约卡塔赫纳生物安全议定书：正文和附件. 蒙特利尔：生物多样性公约秘书处

宋思扬，楼士林主编. 2001. 生物技术概论. 北京：科学出版社

王晓玲，文晔. 2002. 转基因食品恐慌调查. 商务周刊，(1)：26～38

魏伟，钱迎倩，马克平. 1999. 转基因作物与其野生亲缘种间的基因流. 植物学报，41 (4)：343～348

魏伟，钱迎倩，马克平. 1999. 害虫对转基因作物的抗性及其管理对策. 应用与环境生物学报，5 (2)：215～228



魏伟，钱迎倩，马克平，桑卫国．1999. 遗传修饰生物体生态风险的环境监测．生物多样性，7（4）：312～319

魏伟，钱迎倩，马克平，裴克全，桑卫国．2001. 转基因食品安全性评价的研究进展．自然资源学报，16（2）：184～190

魏伟，马克平．2002. 如何面对基因流和基因污染．中国农业科技导报，4（4）：10～15

魏伟，裴克全，桑卫国，钱迎倩，马克平．2002. 转 Bt 基因棉花生态风险评价的研究进展．植物生态学报，26（增刊）：127～132

魏伟，钱迎倩．2001. 生物技术与生物多样性．见：陈灵芝，马克平主编. 生物多样性科学：原理与实践．上海：上海科学技术出版社，191～217

夏友富，田仁礼，朱玉辰主编. 2003. 中国大豆产业发展研究．北京：中国商业出版社

中国生物多样性国情研究报告编写组．1998. 中国生物多样性国情研究报告．北京：中国环境科学出版社

詹姆斯（James C）. 2003. Preview：Global status of commercialized transgenic crops：2003. ISAAA Briefs No. 27. ISAAA：Ithaca，NY.



策划、责任编辑　吴金友　肖基浒
封面设计　傅晓斌



ISBN 7-5038-3956-2
定价：19.00 元